



Cartographie et détection de changement automatique par imagerie de télédétection pour le suivi environnemental en Afrique saharienne et sub-saharienne

Ibrahim Doutoum Mahamat Atteïb

► To cite this version:

Ibrahim Doutoum Mahamat Atteïb. Cartographie et détection de changement automatique par imagerie de télédétection pour le suivi environnemental en Afrique saharienne et sub-saharienne. Autre [cs.OH]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2014. Français. NNT : 2014CLF22510 . tel-01135136

HAL Id: tel-01135136

<https://theses.hal.science/tel-01135136>

Submitted on 24 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT II
ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT FERRAND
THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par

M. Mahamat Atteïb Ibrahim DOUTOUM

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité : Informatique

Titre de la thèse :

**Cartographie et détection de changement automatique par
imagerie de télédétection pour le suivi environnemental en Afrique
saharienne et sub-saharienne**

Soutenue publiquement le 25 novembre 2014 devant le jury :

M. Jean Paul RUDANT	Univ. de Paris Est-Marne-La-Vallée	(Rapporteur)
M. Richard ESCADAFAL	CESBIO - Toulouse	(Rapporteur)
M. Mamadou Kaba TRAORÉ	Université Blaise Pascal	(Directeur de thèse)
M. Christophe GOUINAUD	Université Blaise Pascal	(Co-directeur de thèse)

Dédicaces

À mon père Ibrahîm DOÛTOUM, l'astre qui égaye ma vie.

À ma mère Djara MATAR, la fontaine de mes joies.

À mes frères & soeurs, mes sources d'inspiration.

À mes enfants, la lumière qui guide mes pas.

À mon épouse Fatimé Zara, mon oxygène.

À mes oncles, tantes & cousin(e)s.

À mes neveux & nièces.

À tous les miens.

Remerciements

Louange à Allah, Maître de l'Univers, de m'avoir donné la patience, le courage et la force pour mener à bien ce travail de thèse. Elle a été préparée à l'Université **B**laise **P**ascal de Clermont-Ferrand au sein du **L**aboratoire d'**I**nnovations, **M**odélisation et **O**ptimisation des **S**ystèmes (**LIMOS**).

Je remercie mon directeur de thèse *M. Mamadou Kaba* TRAORÉ, d'avoir accepté de m'accueillir et de m'avoir accordé sa confiance pour entreprendre ce travail de thèse. Il m'a permis de travailler dans de très bonnes conditions. Je le remercie encore pour sa disponibilité & sa convivialité.

Je tiens à remercier très sincèrement *M. Christophe* GOUINAUD, mon encadrant et co-directeur de thèse, dont l'enthousiasme m'a guidé et soutenu depuis mes premiers pas dans la recherche jusqu'à la rédaction de ce mémoire. Son écoute, sa disponibilité, et ses précieux conseils ont été sans faille. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler à votre côté et j'ai beaucoup appris.

M. Jean Paul RUDANT et *M. Richard* ESCADAFAL m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce mémoire. Je leur suis sincèrement reconnaissant de l'attention portée à mon travail, ainsi que des conseils prodigués.

Je remercie du fond de coeur, l'ensemble des enseignants chercheurs du LIMOS. En particuliers Professeurs Alain Quilliot, Vincent Barra, Engelbert Mephu, Fatiha Bendali et Philippe Lacomme pour leurs conseils et leurs encouragements. De même, l'équipe technique, je cite : Rose Seguy, Pascale Gouinaud, Béatrice Bourdieu, & Martine Caccioppoli pour leur gentillesse, tout au long de mes multiples séjours.

Je ne saurais oublier mes mentors & collègues de la FSEA ainsi que les responsables de l'Université de N'Djamena. Il s'agit principalement de Mahamat A. ALHABO, Koïna RODOUMTA, Henri SOSSO, Mahamat A. DOUTOUM, Hamdane ANNADIF, Mahamat BARKA, Abakar ZOUGOULOU, Malloum SOULTAN, Ali A. HAGGAR, Nadjatonon NGARMAIM, Mahamat AHMAT-CHARFADINE, Ngargueudedjim KEMTANGAR, Mahamat AHMAT M. & Adoum ISAAC.

Mes sincères remerciements à l'endroit des institutions qui ont financé mes travaux de recherche : Campus France, le projet RAMSES, LIMOS & l'Université de N'Djamena.

Je ne peux me retenir à remercier l'ensemble des thésards avec qui j'ai partagé de très bons moments, en particuliers : Kahina, Yahia, Lakhdar, Djelloul, Waibaye, Alhassane et Jan.

Tout au long de cette thèse, j'ai vraisemblablement été négligeant envers ma famille & mes parents, en laissant passer le travail au premier plan. Qu'ils me pardonnent de tout ce que je leur ai fait subir et je les remercie vivement de la patience dont ils ont fait preuve. J'éprouve énormément de gratitude à votre égard qui constitue un des piliers de ce travail. Vous m'avez toujours encouragé, remonté le moral et apporté votre soutien. J'exprime à travers ce modeste travail de thèse ma plus sincère reconnaissance. Je pense que cette cohésion familiale servira d'exemple aux petits. Je veux votre bonheur Aujourd'hui et pour toujours.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mes compatriotes de France pour leur amitié et l'ambiance véritablement chaleureuse : A.TANGUIR, MS IBNI O., O. ALHABO, Aristide et Ammar.

Enfin, une pensée émue à tous les frères, collègues et ami(e)s avec qui j'ai partagé de bons moments pendant toutes mes années d'étude (Tchad, Cameroun, France). Je m'astreins à un devoir de reconnaissance à l'égard de tous.

Merci à ceux dont le nom m'est parfois inconnu et qui ont contribué efficacement, par leur sourire et bonne humeur, à rendre mes séjours plus sereins et à vous qui êtes entrain de consulter cette thèse.

Que tous ceux et celles que je n'ai pas cités, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

Les images radar des surfaces planétaires fournissent une mine d'information sur l'espace imagé. La disponibilité des images SAR (Synthetic Aperture Radar) donne la possibilité de cartographier des régions inconnues, difficilement accessibles, ou peu propices à la vie de l'Homme. Cependant, les images de télédétection radar présentent plusieurs défauts, dont le speckle et une ou plusieurs formes de distorsion géométrique.

L'objectif de cette étude est de développer des méthodes capables d'identifier et de caractériser des changements affectant les surfaces des dunes à partir des données satellitales acquises à différentes dates et provenant de différentes sources. Elles donnent ainsi, la possibilité de cartographier, de catégoriser et de surveiller des zones affectées par des événements naturels survenus au cours du temps.

Mots clés : dunes, SAR, profil, radar, SAR, télédétection, radarclinométrie, fréquence.

Abstract

Radar images of planetary surfaces provide a wealth of information on the imaged area. The availability of SAR (Synthetic Aperture Radar) images provides the ability to map unknown regions, difficult to access, or not conducive to the human life. However, the radar remote sensing images have several defaults, the speckle and one or more forms of geometrical distortion.

The aim of this study is to develop methods that can identify and characterize changes in dune areas using satellite data acquired at different times and from different sources. So they give the possibility to map, categorize and monitor areas affected by natural events along time.

Keywords : dunes, SAR, Profile, radar, SAR, remote sensing, radarclinometry, frequency.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte	1
1.2	Description du site	2
1.2.1	Zone d'étude : Tibesti	2
1.2.2	Régime des vents et le climat	3
1.2.3	Formation et description des images SAR	5
1.3	Objectif de l'étude	6
1.4	Problématique	6
1.5	Contribution de la thèse	7
1.6	Organisation de la thèse	8
1.7	Financement de la thèse	9
2	État de l'art	11
2.1	Introduction à la télédétection	11
2.1.1	Généralités	11
2.1.2	Le rayonnement électromagnétique	12
2.1.3	Le spectre électromagnétique	13
2.1.4	Conclusion	15
2.2	Plates-formes et résolutions	15
2.2.1	Orbite et fauchée	16
2.2.2	Espacement des pixels, échelle et résolution spatiale	17
2.2.3	Résolutions spectrale, radiométrique et temporelle	18
2.2.4	Distorsion géométrique des images	19
2.2.5	Conclusion	19
2.3	Radar SAR	21
2.3.1	Définition et principe de base des radars	21
2.3.2	Systèmes radar imageur et non imageur	21

2.3.3	Systèmes radar en télédétection	22
2.3.4	Géométrie des images	23
2.3.5	Intérêt des capteurs radar par rapport aux capteurs optiques	24
2.3.6	Acquisition des données	25
2.4	Dunes de sable	25
2.4.1	Introduction	25
2.4.2	Généralités	26
2.4.3	Les problèmes engendrés par l'évolution des dunes	27
2.4.4	La dune à l'échelle du grain	28
2.4.5	La dune à l'échelle de l'individu dune	30
2.4.6	La dune à l'échelle du champ de dune	32
2.4.7	Les déserts, la détection de changement et les dunes	33
2.4.8	Conclusion	35
2.5	Travaux en télédétection et les déserts	35
2.5.1	Formation des images SAR	36
2.5.2	Imagerie SAR des dunes	37
2.5.3	Analogie entre les vagues de la mer et les dunes linéaires	38
2.5.4	Mécanisme d'imagerie des dunes linéaires	38
2.6	Recalage des données	39
2.6.1	Critère de choix	39
2.6.2	Algorithmes de recalage	39
2.7	Méthodes de comparaison d'images	41
2.7.1	Superposition d'informations	41
2.7.2	Revue des méthodes existantes	41
2.7.3	Quelques autres méthodes	44
2.7.4	Méthode de Rignot	47
2.8	Conclusion	49
3	Analyse des images SAR du désert	51
3.1	Paysage et Image	51
3.2	Analyse de l'aspect image des types de zones intéressantes	58
3.2.1	Zone de roche	59
3.2.2	Dunes	60
3.3	Statistique des images et possibilité de caractérisation	65
3.4	Possibilités de détection	70
3.5	Conclusion	71
4	Méthodes de traitement d'images sur ...	73

4.1	Transformation ponctuelle	73
4.1.1	Transformation pixel à pixel	73
4.1.2	Transformation locale vers un pixel	74
4.1.3	Transformation globale vers un pixel	75
4.2	Transformée de Fourier et changement des formes	76
4.2.1	Calcul de la DFT discrète	76
4.2.2	La transformée de Fourier rapide : FFT	77
4.2.3	Préambule	81
4.2.4	Calcul de suites des échantillons fréquentiels	82
4.2.5	Fréquences de l'image : horizontalement	85
4.2.6	Fréquences de l'image : verticalement	88
4.2.7	Conclusion	89
4.3	Test sur des données de Tibesti	90
4.3.1	Mesure de fréquences du relief	90
4.3.2	Modélisation de l'évolution du relief par rapport à deux scènes	93
4.3.3	Visualisation du profil	97
4.3.4	Comparaison de fréquences de deux sites distincts	98
4.4	Conclusion	100
5	Détection des dunes	103
5.1	But	104
5.2	Seuillage	104
5.3	Méthodes utilisant la moyenne	108
5.3.1	Motivation	108
5.3.2	Voisinage 2D	108
5.3.3	Utilisation d'un voisinage linéaire	109
5.3.4	Résultat d'un voisinage 2D & 1D	110
5.3.5	Utilisation d'un voisinage axial : barrette	115
5.3.6	Utilisation d'un voisinage circulaire en utilisant les barrettes	119
5.3.7	Résultat d'un voisinage axial & circulaire	121
5.3.8	Conclusion	128
5.4	Caractérisation des formes & paramètres statistiques	128
5.4.1	Paramètres statistiques	128
5.4.2	Caractérisation des zones par rapport au coefficient de variation	129
5.4.3	Le coefficient de variation	129
5.5	Les points brillants	131
5.5.1	Définitions	132
5.5.2	Recherche et suivi des points brillants	133

5.6	Détection conjointe & corrélations	134
5.6.1	Principe de la détection conjointe	137
5.6.2	Corrélation	137
5.6.3	Résultats et interprétation	141
5.6.4	Évaluation	144
5.7	Recherche des variations de formes par "shape from...	147
5.7.1	Radarclinométrie adaptée à notre problème	147
5.7.2	Mise en oeuvre pratique	149
5.7.3	Résultats	149
5.7.4	Évaluations	156
5.8	Conclusion	156
6	Conclusion générale	159
6.1	Occupation des sols et caractérisation	159
6.2	Méthodes proposées	160
6.3	Commentaires des résultats	161
6.4	Perspectives et conclusion	162
6.4.1	Perspectives	162
6.4.2	Conclusion	162

Introduction générale

Ce chapitre introductif donne un aperçu de la thèse. Dans un premier temps, nous situons notre sujet de recherche dans son contexte global ainsi que la description de la zone d'étude. Puis, nous décrivons les difficultés que pose notre problématique suivi de l'objectif qu'on s'est fixé. Ensuite, les contributions apportées par cette thèse sont annoncées. Enfin, l'organisation de la dite thèse ainsi que les institutions qui ont financé nos travaux viennent clôturer le chapitre.

Sommaire

1.1	Contexte	1
1.2	Description du site	2
1.3	Objectif de l'étude	6
1.4	Problématique	6
1.5	Contribution de la thèse	7
1.6	Organisation de la thèse	8
1.7	Financement de la thèse	9

1.1 Contexte

Les moyens satellitaires mis en place par les grandes nations et la communauté scientifique se sont considérablement développés lors de la deuxième moitié du XX^{me} siècle. Le mobile était entre autres de mesurer, de comprendre et d'étudier des phénomènes naturels indicateurs de l'évolution terrestre. Nous pouvons citer les mesures relatives à l'évolution de la température, de la concentration des gaz à effet de serre, ... et notamment l'évolution des déserts.

À ce propos, les pays sahariens et sahéliens sont composés de régions arides et semi-arides, où très souvent le vent souffle. Les grains de sables arrachés par le vent se déposent un peu plus loin sous l'influence de leur poids. Ils vont se cumuler pour former des dunes dans le désert. Ces dunes, à leurs tours, vont se mettre à se déplacer, sous l'effet de tempêtes. Elles mettent en danger des villes et des villages environnants. La vie des Hommes alors menacée

par la destruction lente des terres cultivables. D'un point de vue mathématique, ces dunes manifestent un motif périodique (en terme de distribution spatiale). Leurs caractéristiques sont régulières dès que la zone aride est une surface suffisante pour accueillir un grand nombre de dunes.

La connaissance de déplacement de dunes de sable dans le désert a une importance capitale. En voici quelques unes :

- ◊ leur recul expose les populations aux alentours à des perpétuels déplacements créant ainsi des destructions de l'environnement,
- ◊ leur disparition fait craindre des tempêtes de sables assez mouvementées,
- ◊ ce sont des marqueurs très riches du climat passé et temoins de l'évolution terrestre.

L'accès difficile aux régions désertiques, la dangerosité du milieu et le coût des déplacements ont propulsé la télédétection comme un outil alternatif aux mesures in situ des endroits difficiles. Et dans ce contexte là, l'imagerie SAR¹ appelée en français RSO² occupe une place importante.

1.2 Description du site

Notre site d'étude porte sur le Tibesti, une région du Tchad. En effet, le Tchad est un pays d'Afrique centrale dont sa superficie est de 1 284 000 km^2 . Il s'étire du sud au nord sur 1 700 km, voit ses paysages changer radicalement : on passe des vertes forêts du sud aux dunes de sable du Sahara, hantées par les rochers basaltiques et les fumerolles des volcans du Tibesti, ou par des falaises tatouées de peintures rupestres de l'Ennedi [1].

Dans cette section, nous envisageons présenter sommairement les principales caractéristiques de la zone d'étude, en ce qui concerne :

- ◊ la région d'étude,
- ◊ le régime des vents ainsi que le climat,
- ◊ enfin, la description des images RSO.

1.2.1 Zone d'étude : Tibesti

Le Tibesti est une région désertique située dans le nord du Tchad, dominé par un massif. Il est indiqué dans le schéma de la figure FIG. 1.1. Le massif du Tibesti forme la plus grande et la plus haute chaîne montagneuse du Sahara central, avec une superficie de 75 000 km^2 .

Dans le Tibesti, on trouve le point le plus haut du Sahara : l'Emi Koussi qui culmine à 3 415 mètres. Plus à l'ouest, le Toussidé n'a pas grand-chose à lui envier, du haut de ses 3 265 mètres. Ce volcan encore actif, domine de plus de 1 000 mètres le trou au natron. C'est un vaste cratère de 8 km de diamètre et d'environ 1 000 mètres de profondeur [1].

Une grande variété de formes de dunes se trouve dans le désert du Tibesti, et a été signalée dans de nombreuses classifications par les géoscientifiques. Les formes dépendent essentiellement de la quantité de sable disponible et sur le changement de la direction du vent sur l'année.

¹SAR : Synthetic Aperture Radar

²RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture

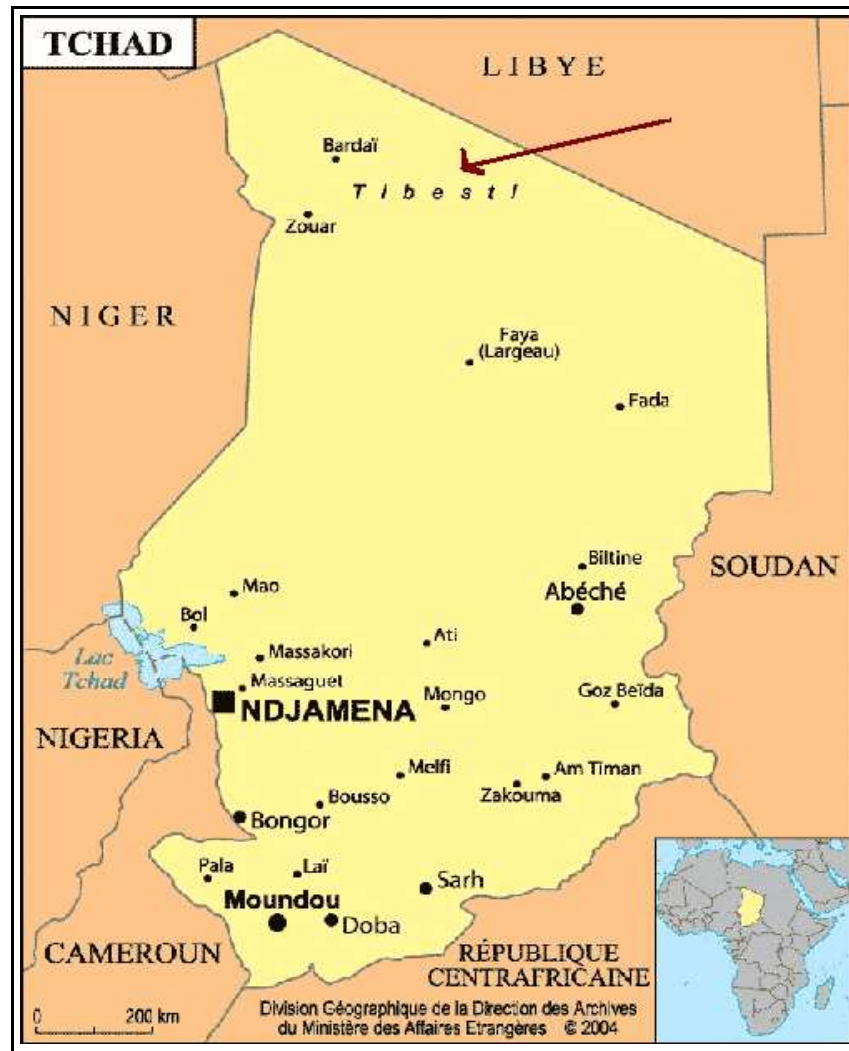


FIG. 1.1: Carte de localisation du Tibesti

1.2.2 Régime des vents et le climat

Dans cette zone désertique du Tibesti, les observations météorologiques sont rares. Les pluies sont d'une excessive rareté, les vents au contraire d'une fréquence et d'une régularité exceptionnelles. La température atteint le 50°C dans les vallées, avec des écarts possibles de 30° en vingt quatre heures. Pendant l'hiver il gèle sur le haut plateau d'Emi Koussi.

Le couloir du Tibesti enregistre des records d'aridité, avec sa quasi-absence de pluie et ses vents desséchants soufflant plus de 300 jours par an. Un schéma illustratif [2] de la direction de vents est fourni par la figure FIG. 1.2. Il représente une carte géomorphologique d'une partie du Tibesti.

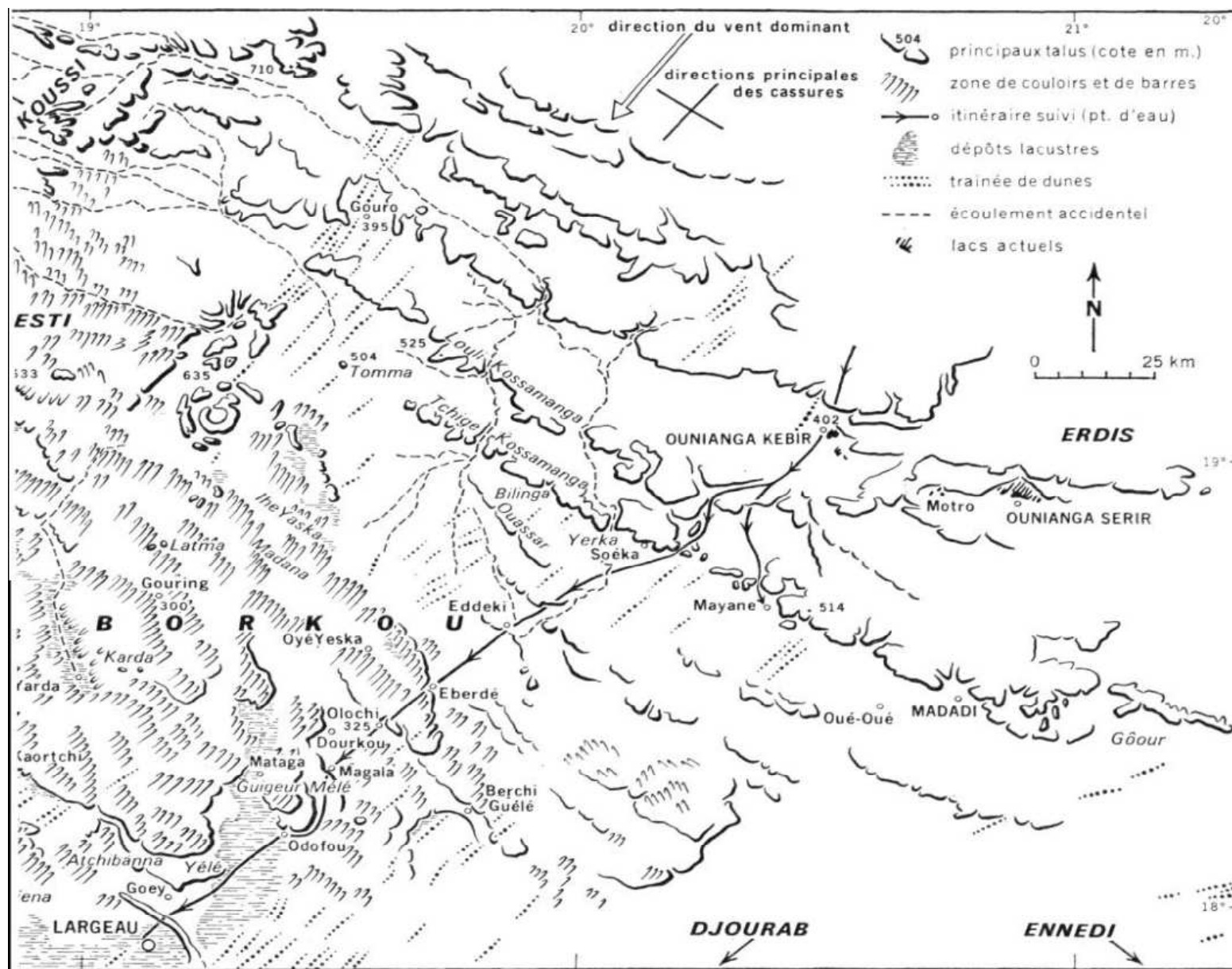


FIG. 1.2: Carte géomorphologique d'une partie du Tibesti [2]

1.2.3 Formation et description des images SAR

Un objet physique va être transformé en une image numérique par divers dispositifs de transformation (caméra, scanner, satellite,...). Cette image numérique est composée de pixels contenant chacun différentes informations (intensité lumineuse, couleur,...). Chaque pixel possède une valeur radiométrique par canal qui compose l'image.

Ces informations sont codées dans une grille échelonnée par niveau de gris, de 0 à $2^n - 1$ où n désigne la profondeur de l'image. L'image ainsi obtenue, après acquisition, renferme un nombre élevé d'informations. Ces informations sont généralement imparfaites ; puisque les conditions d'acquisition ne sont jamais parfaites à cause de la présence de bruit, des distorsions,...

Les images de télédétection proviennent de la mesure de la réflexion de la lumière captée par un système permettant de construire une matrice de pixels donnant une représentation d'une parcelle de terrain. Le rayonnement capté peut être dans le domaine du visible comme par exemple la réflexion de la lumière solaire. Il peut également provenir de tous les autres domaines du spectre électromagnétique dont le domaine des ondes radar. Dans ce domaine, les capteurs sont actifs ou passifs suivant qu'il possède un émetteur radar ou s'il se contente de mesurer le rayonnement propre de la terre. Ce rayonnement est enregistré par divers capteurs. Ces capteurs sont embarqués à bord de vecteurs : avions ou satellites. Les caractéristiques inhérentes aux capteurs les rendent tributaires à un domaine d'application donné [3]. Globalement, on peut les caractériser à partir de trois résolutions : spectrale, spatiale et temporelle. Notre étude exploite les données de capteurs radar actif particulier, appelés RSO, décrit en détail dans la suite de ce document.

Les images qui nous ont été fournies ont été acquises par le satellite ENVISAT³. Ces images sont de type PRI⁴, dont une taille de pixels est de $12.5 \times 12.5 \text{ m}^2$ au sol. Les dates d'acquisition ainsi que d'autres précisions sont fournies dans le tableau TAB 1.1.

Caractéristiques	Image 1	Image 2
Station d'acquisition	PDAS-F	PDAS-F
Centre de traitement	UK-PAC	I-PAC
Date de commande	21/11/2011	21/11/2011
Heure commande	11 : 13 : 37.000000"	11 : 38 : 52.000000"
Date d'acquisition	27/10/2004	1 ^{er} /11/2006
Début d'acquisition	08 : 56 : 39.648881"	08 : 56 : 36.058093"
Fin d'acquisition	08 : 56 : 56.928482"	08 : 56 : 53.337709"
Satellite	ENVISAT	ENVISAT
Orbite	+13903	+24424
Cycle	+031	+052
Type de passage	Descendant	Descendant

TAB. 1.1: Information sur le jeu de données

³ENVISAT : ENVironmental SATellite/European Space Agency Environmental Satellite

⁴PRI : PRecision Image

Cette information est importante pour les comparaisons des observations de terrain, et dans la détermination de l'existence d'effets saisonniers ou pas.

À cause des problèmes de géométrie propre à l'acquisition, ces images ne peuvent pas être superposables entre elles directement. Une étape de correction géométrique est nécessaire avant de pratiquer des méthodes de détection de changements multi-temporelles.

1.3 Objectif de l'étude

L'objectif principal de cette étude est de développer une méthode capable d'identifier et de caractériser des changements affectant les surfaces des dunes à partir des données satellitales acquises à différentes dates et provenant de différentes sources. Il convient donc de développer des méthodes automatiques permettant de détecter des éléments de paysages sur des capteurs différents de façon à permettre des études à court ou à long terme. Il faut donc s'affranchir de l'obsolescence des capteurs dans le cas d'études à long terme et du délai de passage d'un même capteur dans le cas d'étude à très court terme.

Ensuite, il est question de montrer d'une part, le potentiel de l'utilisation de la télédétection pour la caractérisation de dunes et son déplacement spatio-temporel à partir d'une série d'images satellitaires de différentes dates. D'autre part, de donner la possibilité aux potentiels responsables locaux, et décideurs s'intéressant à la question de l'avancée du désert d'avoir des informations fiables sur l'état de l'environnement du Sahel à partir d'images SAR via les méthodes originales de détection de changement.

Enfin, en un mot, le but de ce travail étant de proposer/exhiber une méthode automatique de détection de changement des dunes. Elle devra s'affranchir du speckle et des distorsions géométriques en faisant notamment une distinction de caractéristion des régions d'étude.

1.4 Problématique

L'étude de la détection de changements par imagerie satellitale est complexe [4]. Plus souvent, les images fournies par les plates formes de télédétection (optiques et radars) sont assujetties à des conditions de prise de vue, généralement difficiles à contrôler. En outre, l'étude des zones désertiques reste particulièrement difficile [5], en raison de la variabilité temporelle et géométrique de la surface du sol [6].

Nous avons choisi de caractériser les dunes de sable dans le Sahara. D'une part, il est important de suivre leur déplacement dans le désert et elles sont accessibles. D'autre part, c'est aussi pour évaluer l'intérêt des images SAR dans la télédétection du désert, en particulier celles du sud-ouest du Tibesti.

Détecter des changements des dunes à partir d'images satellitales soulève plusieurs problèmes, notamment :

♦ Speckle et distorsions géométriques

Les images de télédétection radar présentent plusieurs défauts, dont le speckle et une ou plusieurs formes de distorsion géométrique. Le speckle est inhérent aux images radar. La distorsion géométrique dépend de la morphologie du relief et de l'angle d'incidence du

satellite. Par conséquent, l'utilisation de toute image radar nécessite au préalable la réduction des fluctuations des valeurs radiométriques des pixels et des techniques adaptées.

◊ **Diversité des zones d'études**

La zone d'étude offre divers paysages : sables, sol dur et des roches montagneuses. Les zones au sol dur ne changent pas beaucoup, mais elles montrent des variabilités géométriques dues à l'érosion en raison des anciennes pluies. Les zones constituées de sable ont des formes régulières, mais avec beaucoup de changements au cours du temps. Comme les dunes se déplacent, elles changent de formes en même temps, ce qui ajoute des contraintes supplémentaires dans le suivi des changements.

◊ **Choix de la méthode de détection à utiliser**

La quasi majorité des méthodes de détection rencontrées dans la littérature n'apportent malheureusement pas grand chose. Cela s'explique par le bruit inhérent aux images radar ou encore l'utilisation de certaines techniques nécessitent plusieurs images [7] alors nous avons que deux images à notre disposition. En général, le choix d'une méthode de détection pose problème.

◊ **Choix de la méthode de comparaison à déployer**

La comparaison d'images a un impact considérable dans plusieurs domaines, notamment en télédétection. Il existe deux types de comparaison :

1. Comparaison directe

Elle semble ne pas être très adaptée à ce type d'étude. En général, les images ne sont pas directement superposables. En procédant de la sorte, on risque de comparer dès le départ, des endroits totalement différents. Cela induit implicitement de fausses informations. Elle n'intègre pas non plus, les techniques de recalage lors du traitement.

2. Comparaison après prétraitement

Les résultats obtenus pendant cette phase sont souvent prometteurs. Cela s'explique d'une part par le fait que les speckle ainsi que la distorsion géométrique sont considérés lors du traitement. D'autre part, la prise en compte de la morphologie du terrain lors de l'élaboration des techniques, semble porter ses fruits également.

En outre, pour des applications qui peuvent être coûteuses en temps de calcul et de développement, il est intéressant de détecter que ce qui est nécessaire ; dans le but d'optimiser le temps de calcul. Ce verrou n'est pas spécifique aux images satellites SAR. Néanmoins, il donne des contraintes particulières dans l'élaboration des méthodes de traitement adéquates.

1.5 Contribution de la thèse

Les méthodes de détection de changement proposées dans la littérature que nous avons consultées sont nombreuses. Elles reposent en générale sur des calculs statistiques. Nous constatons qu'il n'existe pas une seule technique de détection de changement standard applicable à tous les cas de figure. En outre, ces méthodes sont basées quasiment sur des algorithmes directionnels. Cependant, elles tentent à résoudre le problème de détection de changement sans prendre en considération un certain nombre des particularités : par exemple

la diversité de la zone d'étude, les distorsions géométriques ainsi que l'angle d'incidence ou le phénomène de speckle.

De ce fait, nous avons mis au point des méthodes originales pour répondre à notre sujet de thèse. Ainsi donc, quelques techniques nouvelles ont vu le jour, on peut citer entre autres :

- ◊ Techniques reposant sur les concepts de filtres moyens linéaires et bidimensionnels. Certaines sous types exploitent les notions de barrettes axiales et circulaires.
- ◊ Technique utilisant les points brillants. Elle met en lumière les dunes co-détectées sur les deux images de la même scène.
- ◊ Techniques pour une éventuelle détection conjointe en exploitant les concepts de la corrélation entre deux images de la même scène.
- ◊ Technique utilisant les variations de formes par "shape from shading". Elle met en avant les principes de radarclinométries.
- ◊ Et enfin, certaines simulant la rose de vent dans le but de choisir le meilleur angle générant la valeur radiométrique optimale.

La technique reposant sur les profils radiométriques quantifie au mieux le changement intervenu sur chaque pixel contrairement aux autres qui ne permettent ni de quantifier le changement ni de les localiser.

Il faut aussi noter au passage que notre étude est novatrice autant par la zone d'étude que par les méthodes proposées.

1.6 Organisation de la thèse

Ce mémoire de thèse est organisé en six chapitres.

Le premier chapitre porte sur "l'introduction générale". Il est dédié au contexte, à la description du site, à l'objectif de la thèse, à la problématique, à la contribution de nos travaux, au financement/situation de la thèse et enfin à l'organisation de la thèse.

Le second chapitre "état de l'art" porte sur une présentation préliminaire d'un ensemble de concepts indispensable à nos travaux. Notamment, l'analyse des différentes techniques qui ont été développées ces dernières décennies dans le domaine de la détection de changements. Notre objectif sur l'"étude de dunes" était de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de méthodes ainsi que les particularités des unes par rapport aux autres. Ceci nous a permis, par la suite de clarifier et de mettre en amont les facteurs qui ont inspiré nos choix.

Le troisième chapitre est consacré à une analyse des éléments intéressants des images SAR du désert du Tibesti au nord de Faya-Largeau. Cette région présente l'avantage de comporter plusieurs types de paysages et donc de nous permettre d'étudier les possibilités de détection de changement sur ce type de zone.

Le quatrième chapitre retrace les méthodes de traitement des images sur laquelle la détection peut s'appuyer. Il met en avant les points brillants/sombres et les franges brillantes pour faciliter la détection de changement élaborée dans le chapitre suivant. En outre, les concepts sur la tranformation ponctuelle, la transformation de Fourier et le changement de formes sont de même présentés afin d'être pris en considération dans des technqiues en aval.

Le cinquième chapitre est dédié aux techniques originales que nous avons mises au point

pour faire face à notre sujet. Il est au coeur de nos travaux.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à la conclusion générale. Il présente les résultats obtenus pendant la thèse. Nous évaluons les résultats afin de conclure sur la meilleure stratégie à adopter. Nous résumons, les différentes approches élaborées, la démarche suivie, les méthodes retenues et la contribution apportée. Enfin, il situe les perspectives à court, moyen et long terme.

1.7 Financement et situation de la thèse

Ce travail de thèse a été financé en partie par une bourse BGF⁵ (38%) accordé par le SCAC⁶ de l'ambassade de France à N'Djaména (Tchad), dans l'optique de renforcer les capacités des enseignants de l'Université. Une deuxième partie (40%) par le projet **RAMSES**⁷ & **LIMOS**⁸ ; pour maintenir un rythme constant de travail. Enfin (16%) par mon institution d'origine : Université de N'Djaména, afin de finaliser les travaux.

L'encadrement scientifique de la thèse est assuré par Christophe Gouinaud & Mamadou Kaba Traoré au sein de l'axe **MAAD** (Modèles et Algorithmes de l'Aide à la Décision).

Enfin, ce travail s'inscrit dans le cadre de la formation doctorale **SPI** (Sciences Pour l'ingénieur) de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand II, dirigée par la directrice Pr. Françoise Paladian.

⁵BGF : Bourse du Gouvernement Français

⁶SCAC : Service de Coopération et d'Action Culturelle

⁷RAMSES : Réseau Africain pour la Mutualisation et le Soutien des pôles d'Excellence Scientifique

⁸LIMOS : Laboratoire d'Informatique, Modélisation et Optimisations des Systèmes

Tableaux

1.1	Information sur le jeu de données	5
-----	---	---

Figures

1.1	Carte de localisation du Tibesti	3
1.2	Carte géomorphologique d’une partie du Tibesti [2]	4

Chapitre 2

État de l'art

Ce chapitre sur l'état de l'art est constitué de huit sections : **Introduction à la télédétection**, **Plates-formes et résolutions**, **Radar SAR**, **Dunes de sables**, **Travaux en télédétection et les déserts**, **Recalage des données**, et enfin les **Méthodes de comparaison d'image** où nous présentons succinctement ce qu'il y a dans la littérature. Nous terminerons bien évidemment ce chapitre par une conclusion.

Sommaire

2.1	Introduction à la télédétection	11
2.2	Plates-formes et résolutions	15
2.3	Radar SAR	21
2.4	Dunes de sable	25
2.5	Travaux en télédétection et les déserts	35
2.6	Recalage des données	39
2.7	Méthodes de comparaison d'images	41
2.8	Conclusion	49

2.1 Introduction à la télédétection

2.1.1 Généralités

Le terme "télé" signifie de loin ou à distance. La télédétection est la manière d'obtenir de l'information à distance. Parmi nos cinq sens, trois utilisent la télédétection (la vue, l'odorat et l'ouïe)[8].

Formellement, le terme "télédétection" signifie observer la Terre avec des instruments placés très haut au-dessus de la surface. Ces instruments sont sensibles à la lumière visible, mais aussi à d'autres parties du spectre électromagnétique : l'infrarouge, l'ultraviolet et les micros-ondes. Ils peuvent imager de très grandes surfaces, parfois un continent, car ils sont très haut au-dessus du sol.

De nos jours, la télédétection, appelée aussi "observation de la Terre", se fait à partir de l'espace par des satellites. Plusieurs pays, dont la France, disposent de tels instruments. Chaque jour, plusieurs dizaine de milliers d'images sont transmises aux stations de réceptions. La Terre est presque entièrement imagée toutes les semaines à différentes résolutions.

Dans la suite de nos travaux, nous retenons la définition donnée par [9] : « *La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci* ». Elle englobe tout un processus consistant à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

Elle nécessite une interaction entre l'énergie incidente et des cibles. En outre, elle peut également utiliser l'énergie émise par les objets et des capteurs non-imageurs, cf : 2.3.2.

Le processus de la télédétection au moyen des systèmes imageurs comporte sept étapes.

À Source d'énergie : À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

Déformation atmosphérique : Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

Interaction avec la cible : Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface [9].

Enregistrement de l'énergie par le capteur : Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance pour être enfin enregistrée. L'échantillonnage et la quantification se font sur le satellite.

Transmission, réception et traitement : Le signal enregistré est transmis, souvent par des moyens électromagnétiques, à une station de réception où l'information est transformée en images.

Interprétation et analyse : Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

Application : La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, afin de découvrir de nouveaux aspects ou pour nous aider à résoudre un problème particulier.

Nous nous intervenons essentiellement au niveau des phases , & .

2.1.2 Le rayonnement électromagnétique

Afin d'imager une cible, une source sous forme de **rayonnement électromagnétique** est nécessaire pour éclairer la cible, à moins que celle-ci ne produise elle-même cette énergie.

Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique (RE) possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le RE est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (B). Le champ E varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ B est

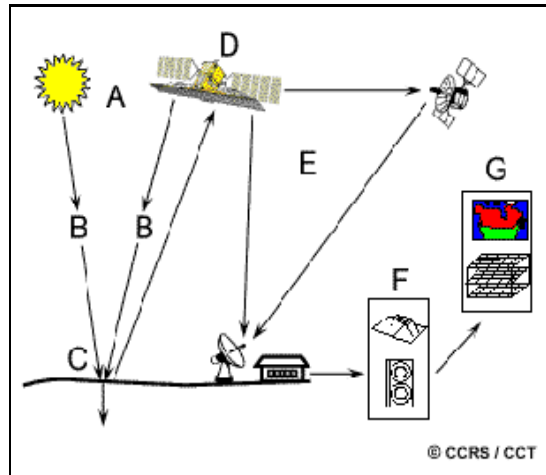


FIG. 2.1: Principe de l'acquisition de l'information par télédétection [9]

orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière (c).

Pour une bonne appréhension de la télédétection, il est utile de cerner les deux caractéristiques du rayonnement électromagnétique que sont la **longueur d'onde** notée λ et la **fréquence** notée f . λ est mesurée en mètres ou en l'un de ces sous-multiples tels que les nanomètres. f est normalement mesurée en Hertz (Hz) ou en multiples de Hertz. L'équation suivante illustre la relation entre λ & f pour les ondes électromagnétiques :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

λ & f sont donc inversement proportionnelles, c'est-à-dire que plus λ est petite, plus f est élevée, et plus λ est grande, plus f est basse.

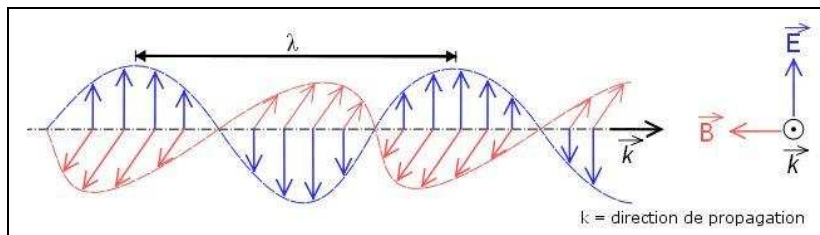


FIG. 2.2: Structure d'une onde électromagnétique

2.1.3 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique, FIG 2.3 (a), page 14, s'étend des courtes longueurs d'ondes (rayons gamma et X) aux grandes (micro-ondes et ondes radio). Il s'étale théoriquement de zero à l'infini en fréquence f (respectivement en longueurs d'onde λ), de façon continue.

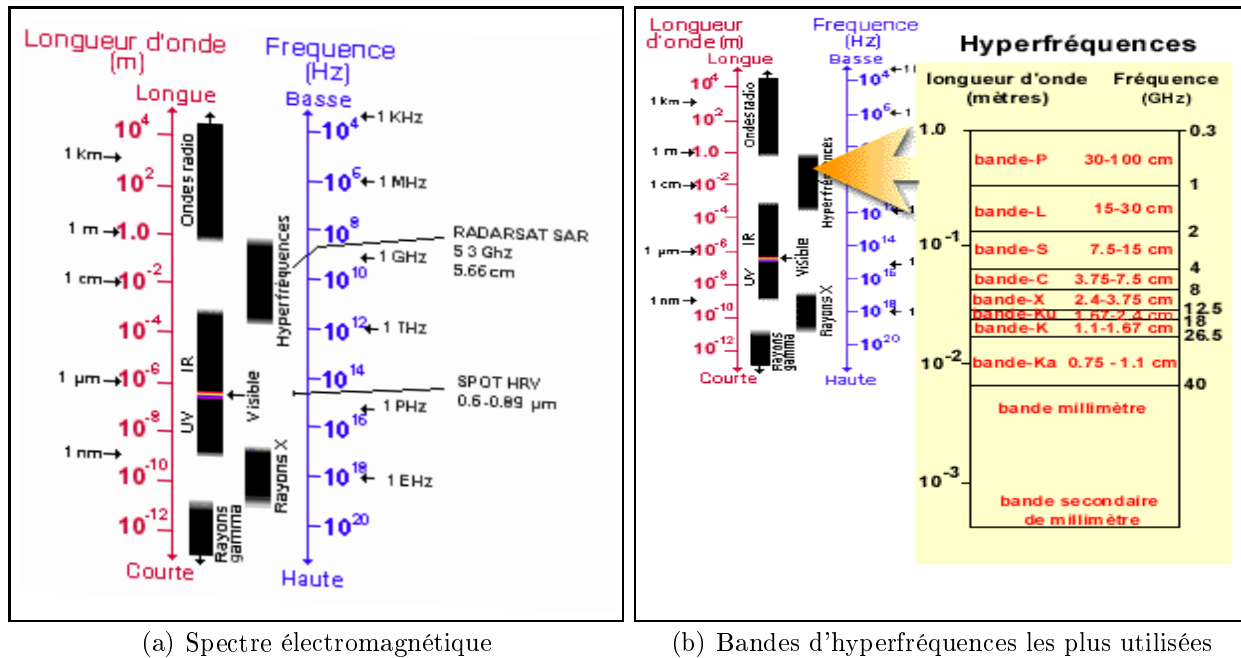


FIG. 2.3: Spectre électromagnétique & Bandes d'hyperfréquences les plus utilisées en télédétection

Pour des considérations tant historiques que physiques, le spectre électromagnétique est segmenté en plusieurs domaines de f , λ ou énergie. Le spectre de la lumière visible correspond à un domaine très étroit du spectre électromagnétique complet, de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge) en λ . Jusqu'au *XIX^{me}* siècle, la seule partie du spectre électromagnétique qui était connue était le spectre visible ou spectre optique.

Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans l'**ultraviolet** et les plus grandes dans le domaine des micro-ondes.

Quant aux ondes radio appelées aussi ondes radar, elles sont émises par des dispositifs de type "radar", cf. section 2.3. Ces dispositifs provoquent une augmentation de la température en profondeur. L'avantage de ce "radar" c'est que l'on a besoin que d'un seul émetteur. Il est souvent utilisé dans plusieurs secteurs d'activités : contrôle du trafic aérien & routier, surveillance des orages (en météorologie), etc.

Les bandes d'hyperfréquences les plus utilisées sont toujours identifiées par des lettres qui leur ont été attribuées lors de la seconde Guerre Mondiale, cf. FIG. 2.3 (b).

Pourquoi exploite-t-on la télédétection ?

Elle est utilisée dans beaucoup d'activités [10], à titre d'exemple nous pouvons citer :

- ◊ Le géographe qui souhaite identifier les changements qui doivent être cartographiés.
- ◊ Le forestier qui veut s'informer sur la pollution, les feux de forêt,...
- ◊ L'environnementaliste qui désire détecter, identifier et faire le suivi des polluants.
- ◊ Le géologue intéressé à découvrir des gisements de minéraux.
- ◊ L'agriculteur qui désire faire le suivi de ses récoltes.

- ◇ Le pompier qui doit coordonner son équipe sur le déplacement du feu de forêt.
- ◇ L'informaticien qui souhaite automatiser la recherche d'information des précédents.

La télédétection est vraiment précieuse pour caractériser des zones inaccessibles (planètes) ou trop vaste pour être surveillées par des visites ou des systèmes au sol.

2.1.4 Conclusion

La télédétection permet d'obtenir une vision de la surface de la Terre d'un angle parfaitement inédit. Elle fournit des images qui permettent une telle variété d'échelle de travail que l'on peut mieux saisir dans son entité un phénomène, une organisation ou une structure.

Elle a permis de comprendre la Terre d'abord dans son ensemble et, progressivement, de la découvrir d'une façon de plus en plus détaillée.

2.2 Plates-formes et résolutions

Bon nombre des phénomènes qui nous entourent, ne peuvent être examinés par l'être humain que dans des limites très restreintes : objets éloignés, régions inaccessibles, etc. Pour combler ce vide, l'Homme a dû amplifier à l'aide d'appareils spéciaux la capacité de détection de ses organes.

Une **plate-forme** se définit comme étant tout objet mobile ou immobile pouvant contenir des instruments servant à enregistrer des informations spatiales et spectrales provenant d'objets divers.

Dans cette section, nous allons considérer la composante enregistrement de cette énergie par un capteur en détaillant plus en avant les caractéristiques de la plate-forme de télédétection, des capteurs et des informations qui y sont enregistrées. Dans la foulée, nous évoquons la question de la *distorsion géométrique des images*.

Pour enregistrer l'énergie réfléchie/émise par une surface/cible donnée, un capteur est installé sur une plate-forme distante de la surface/cible observée. Ces plates-formes peuvent être situées près de la surface terrestre, dans un avion, ou à l'extérieur de l'atmosphère : véhicule spatial/satellite. Le **coût** est souvent un facteur déterminant dans le choix des différentes plates-formes.

Dans l'espace, la télédétection est parfois effectuée à partir de la navette spatiale ou plus fréquemment, à partir de satellites. Les *satellites* sont des objets qui sont en orbite autour d'un autre objet, dans notre cas-ci, la Terre. Par exemple, la Lune est un satellite naturel de la Terre, par opposition aux satellites artificiels de la Terre que sont les plates-formes placées en orbite pour les besoins de la télédétection, des communications et de la télémétrie [11]. Grâce à leur orbite, les plates-formes spatiales permettent une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre.

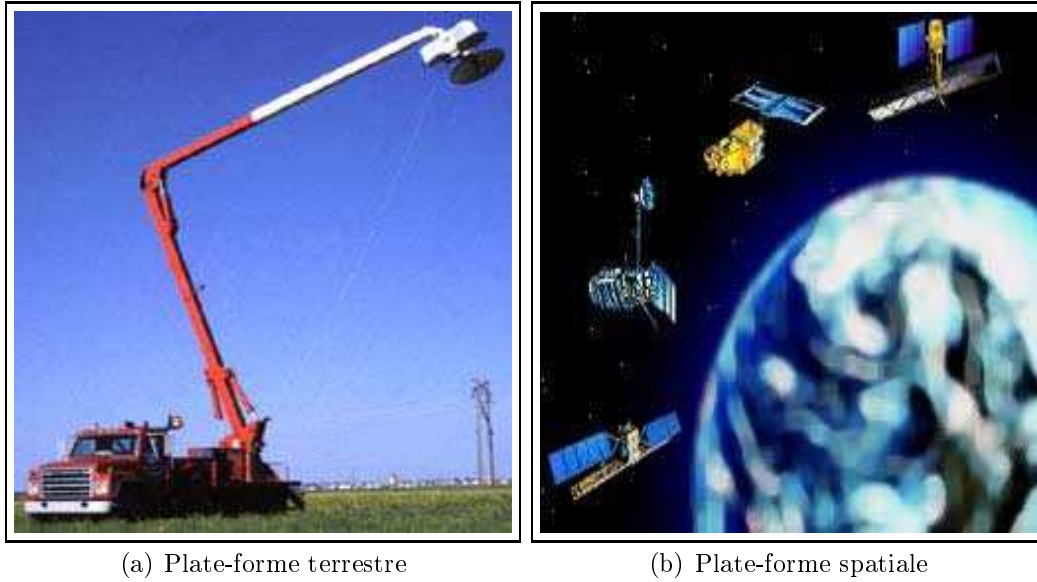


FIG. 2.4: Plates-formes d'acquisition des données de la télédétection

2.2.1 Orbite et fauchée

Bien que les plates-formes terrestres ou aéroportées soient utilisées, ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données nécessaires à notre étude [12]. Certaines caractéristiques propres aux satellites en font des instruments particulièrement utiles pour l'acquisition d'information sur la surface de la Terre.

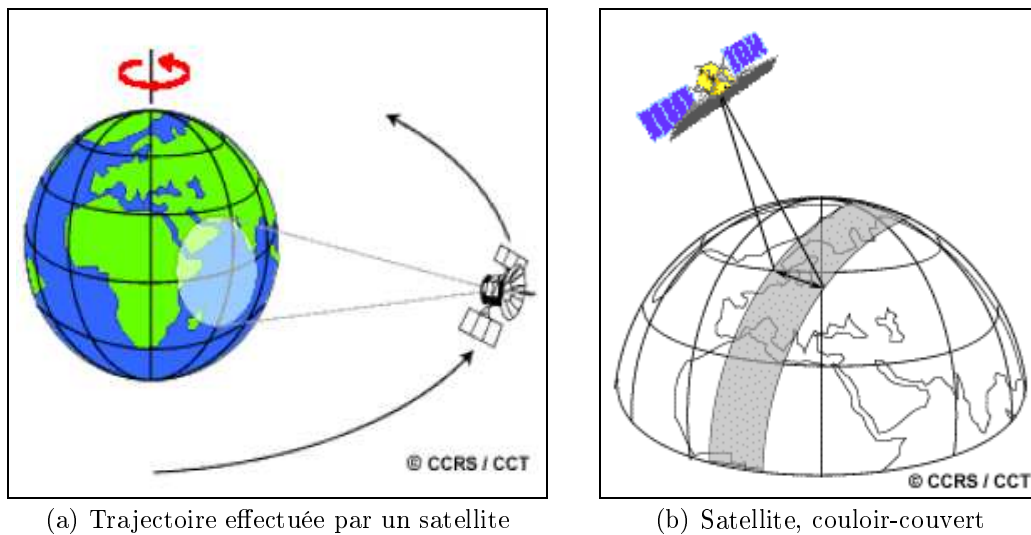


FIG. 2.5: Trajectoire et couloir-couvert d'un satellite

L'orbite d'un satellite FIG. 2.5 (a) est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'une orbite est déterminée par l'altitude, l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. Certains satellites ont une

altitude très élevée et regardent toujours la même région de la surface de la Terre, ils ont une *orbite géostationnaire*. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique.

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur observe une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de *couloir-couvert* ou *fauchée*. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et quelque centaine de kilomètres, cf. FIG. 2.5 (b).

Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points *nadir*. Quant au *cycle de passage* du satellite, il est défini comme étant la période de temps nécessaire pour que le satellite revienne au-dessus d'un point nadir pris au hasard [13].

2.2.2 Espacement des pixels, échelle et résolution spatiale

Pour certains instruments de télédétection, la distance entre la cible observée et la plate-forme joue un rôle important puisqu'elle détermine la largeur de la région observée et le niveau de détail qu'il sera possible d'obtenir. Un capteur placé sur une plate-forme éloignée de la cible pourra observer une plus grande région, mais ne sera pas en mesure de fournir beaucoup de détails. Ce détail dépend de la résolution spatiale du capteur utilisé. La résolution spatiale est fonction de la dimension du plus petit élément qu'il est possible de détecter. Celle d'un capteur passif, décrit à la section 2.3.2, dépend principalement de son champ de vision instantanée (CVI). Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur et détermine l'aire de la surface visible à une altitude donnée et à un moment précis.

Cependant, il y a une différence entre les images satellitales et les photographies aériennes. En effet, le satellite radar a pour avantage de fournir une image de la zone désirée sans se soucier des régions, des conditions climatiques et autres restrictions environnementales. L'image satellitale couvre une surface plus grande que la photo aérienne. Les satellites de télédétection nous offrent l'information numérique avec une régularité qu'aucune autre plate-forme ne possède. Ils donnent une vision de synthèse. C'est pour ces multiples raisons que nous sommes intéressés à ce type d'image satellitale.

Si un capteur à une résolution spatiale de vingt (20) mètres et qu'il est possible de charger à l'écran une image provenant de ce capteur avec la pleine résolution, chaque pixel à l'écran représentera une superficie correspondant à vingt (20) mètres sur vingt (20) mètres au sol. Dans ce cas, la résolution et l'espacement des pixels sont identiques. Par contre, il est possible d'afficher la même image avec un espacement des pixels qui soient différent de la résolution. Sur de nombreuses affiches montrant des images de la Terre prises à partir d'un satellite, on combine plusieurs pixels par différentes techniques, le plus souvent pour obtenir une géométrie analogue aux cartes usuelles. Mais, ceci, ne modifie en rien la résolution spatiale du capteur utilisé.

Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une résolution *grossière* ou *basse*. Les images à résolution *fine* ou *élevée* permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Les capteurs utilisés par les militaires par exemple, sont conçus

pour obtenir le plus de détails possible. Ils ont donc une résolution très fine. Les satellites commerciaux ont une résolution qui varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres.

Le rapport entre la distance que l'on mesure sur une image ou une carte, et la distance correspondante au sol est appelé *échelle*. Une carte ayant une échelle de 1 : 100000 représente un objet au sol de 100000 cm (1km) par un objet de 1 cm. Quand le rapport est petit la carte est dite à petite échelle, à grande échelle dans le cas contraire. Cette notion d'échelle s'emploie souvent par abus sur les images, celle-ci ayant en effet une dimension liée à l'affichage utilisé.

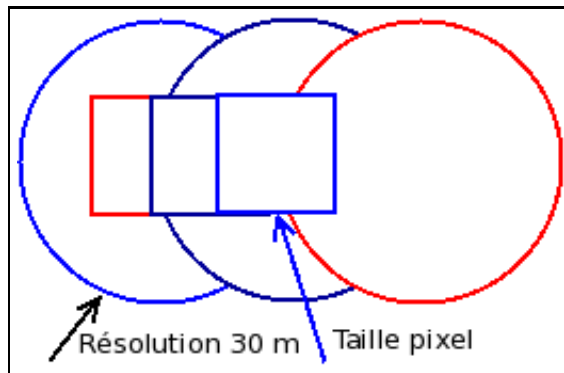


FIG. 2.6: Résolution spatiale et taille pixel

La figure FIG. 2.6 donne une idée dans le cas où la résolution spatiale ne correspond pas avec la taille réelle du pixel au sol.

2.2.3 Résolutions spectrale, radiométrique et temporelle

On appelle résolution spectrale, la capacité qu'a un capteur à pouvoir distinguer deux niveaux d'information suivant leurs longueurs d'ondes. Il est souvent possible de distinguer des classes de caractéristiques et de détails dans une image en comparant leurs différentes réponses sur un ensemble de longueurs d'onde.

Plusieurs dispositifs de télédétection peuvent enregistrer l'énergie reçue selon des intervalles de longueurs d'onde à différentes résolutions spectrales. Ces dispositifs sont appelés capteurs *multispectraux*. Des capteurs multispectraux plus développés, appelés capteurs *hyperspectraux*, sont capables de détecter des centaines de bandes spectrales très fines dans la portion du spectre des ondes électromagnétiques réunissant le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen.

L'arrangement des pixels décrit les structures spatiales d'une image, tandis que les caractéristiques spectrales décrivent l'information contenue dans chaque pixel. Chaque fois qu'une image est captée, la sensibilité du capteur à l'intensité de l'énergie électromagnétique détermine la résolution radiométrique.

La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur

est sensible se nomme plage dynamique.

Les données images enregistrées sont codées numériquement avec le rayonnement. Le plus faible avec une valeur numérique de **0** et le maximum avec la valeur numérique **maximale**. De ce fait, il est clair qu'en comparant une image 2-bits à une image 8-bits d'une même scène, il y aura une énorme différence dans le nombre de détails qu'il est possible de distinguer selon la résolution radiométrique.

En plus de la résolution spatiale, spectrale et radiométrique, l'autre concept important en télédétection est celui de la ***résolution temporelle***.

L'un des grands avantages de la télédétection satellitaire est sa capacité à amasser périodiquement de l'information d'une même région de la Terre. La comparaison d'images multitemporelles permet de détecter ces changements [14]. En amassant des données périodiquement et de façon continue, il est possible de suivre les changements qui surviennent à la surface de la Terre, qu'ils soient naturels ou de source humaine.

2.2.4 Distorsion géométrique des images

Plusieurs formes de distorsion géométrique sont possibles [15]. Toutes les images obtenues par télédétection comprennent, une ou plusieurs formes de distorsion géométrique. Ce problème est inhérent à la télédétection puisque celle-ci tente généralement de représenter des données prises à la surface de la Terre (3D) sur une image 2D. Souvent, les formes de distorsion géométrique dont peut souffrir une image dépend de la façon dont les données ont été acquises. Voici quelques facteurs pouvant influencer la distorsion géométrique :

- ◇ le relief à la surface,
- ◇ le mouvement & la stabilité de la plate-forme,
- ◇ la courbure de la Terre et sa rotation...

Les distorsions dues au mouvement du capteur sont plus prononcées lorsque les données proviennent de plates-formes aériennes que lorsqu'elles proviennent de plates-formes spatiales, car la trajectoire des plates-formes spatiales est relativement stable.

Les causes de distorsions géométriques et des erreurs de positionnement changent d'une situation à une autre. Dans la plupart des cas, il est impossible d'enlever ou du moins, de réduire les erreurs engendrées par la distorsion, mais ces phénomènes doivent toujours être prises en considération avant d'extraire toute information des images. Une caractérisation formelle de la géométrie des images est donnée dans la section 2.3.4.

2.2.5 Conclusion

Les plates-formes couramment utilisées en télédétection sont les avions et les satellites. Cependant, d'autres types sont parfois utilisés dans le cadre de projets précis. En effet, des ballons captifs ou dirigeables, des hélicoptères, ... peuvent supporter l'infrastructure nécessaire à l'acquisition de données.

Cependant, il y a certains satellites qui sont à vocation particulière, cf. TAB. 2.2, page 21.

Plate-forme	Pays	Capteurs Principaux	Altitude (km)	Orbite	Répétitivité (Jours)
ADEOS-1	Japon	AVNIR OCTS	800	Héliosynchrone	41
CTA CLARK	États-Unis	Panchromatique Multibande	475	Héliosynchrone	4-20
IKONOS-A	États-Unis	Panchromatique Multibande	680	Héliosynchrone	3-11
EO-1	États-Unis	LAC, WIS ALIMS, GIS	705	Héliosynchrone	16(LAC)
EOS AM-1	États-Unis	ASTER, CERES MODIS, MOPITT	705	Héliosynchrone	16
ERS-2	Europe	AMI(SAR) ATSR-M	785	Héliosynchrone	3-35
IRS-1D	Inde	Panchromatique WiFS, LISS-3	904	Héliosynchrone	5-24
JERS-1	Japon	SAR OPS	570	Héliosynchrone	44
LANDSAT-5	États-Unis	MSS TM	705	Héliosynchrone	16
LANDSAT-7	États-Unis	ETM_+	705	Héliosynchrone	16
ORBVVIEW-2	États-Unis	Panchromatique Multibande	700	Héliosynchrone	1
QUICKBIRD-1	États-Unis	MSS Multibande	600	Héliosynchrone	1-4
RADRSAT-1	Canada	RSO :Std, Fin ScanSAR, Étendue	798	Héliosynchrone	3-7-24
RESURS-O1	Russie	MSU-SK	678	Héliosynchrone	21
SPOT-4	France	PAN, HRV Végétation	832	Héliosynchrone	4-26

TAB. 2.1: Quelques plates-formes satellitaires et leurs principales caractéristiques [16]

Plate-forme	Pays	Capteurs Principaux	Altitude (km)	Orbite	Répétitivité
GSM-5	Japon	VISSR	36000	Géostationnaire	30 mn
GOES-12	États-Unis	Imager	36000	Géostationnaire	30 mn
GOES-0	Russie	STR	36000	Géostationnaire	30 mn
METEOSAT-7	Europe	Multibande	36000	Géostationnaire	30 mn
NOAA-14 (TIROS-N)	États-Unis	AVHRR OCTS	860	Héliosynchrone	1 jour
OKEAN-4 (SICH-1)	Russie (Ukraine)	MSU-S MSU-MSLR	650	Héliosynchrone	1/2

TAB. 2.2: Quelques satellites à vocation particulière [16]

2.3 Radar SAR

Il existe plusieurs types de satellites de télédétection : RADARSAT (Canada), SPOT (France), ERS (Europe), MOS (Japon), etc. Un classement important provient des ondes spectrales qu'ils exploitent. Nous intéressons, ci-après, au satellite Radar ENVISAT.

2.3.1 Définition et principe de base des radars

Radar est un acronyme qui signifie « Radio Detection And Ranging ». Le principe du radar a été énoncé par Hugo en 1891 [17] se fondant sur les principes de la propagation électromagnétique.

Les radars ont d'abord été conçus pour détecter la présence et la position d'objets en utilisant des émetteurs et récepteurs d'ondes-radio. À cause des propriétés électromagnétiques des ondes-radios, les systèmes radar peuvent acquérir des données dans n'importe quelles conditions atmosphériques, de jour comme de nuit. Pour cette raison, le radar est donc devenu incontournable pour des nombreuses applications de surveillance.

Pour la première fois, ils ont été implantés dans les années 1930 [18] pour la détection des navires et pour mesurer leur distance. C'est un instrument mesurant des distances. Il consiste en :

- ◇ un émetteur,
- ◇ un récepteur,
- ◇ une antenne,
- ◇ et un système électronique pour traiter et enregistrer les données.

2.3.2 Systèmes radar imageur et non imageur

Les systèmes radar peuvent être imageurs ou non. Un exemple bien connu de système non imageur est le radar *Doppler*. Il sert à mesurer la vitesse des véhicules, en déterminant

l'écart entre la fréquence du signal transmis et celle du signal reçu. Cet écart est appelé effet Doppler.

Les systèmes radar imageurs utilisés en télédétection consistent en une **antenne** installée sur un avion ou un satellite. Ces antennes émettent et/ou reçoivent des signaux radar qui sont traités pour produire des images d'une résolution suffisamment fine pour permettre aux interprètes d'identifier des éléments géographiques à la surface de la Terre. Ils sont utilisés depuis les années 1950.

Les systèmes radar imageurs peuvent être actifs ou passifs. Dans un système actif, le radar émet de brèves impulsions d'énergie électromagnétique dans la direction qui présente un intérêt, et enregistre l'origine et l'intensité des échos, c'est-à-dire les signaux réfléchis par les objets dans le champ de vision du système. Dans les systèmes passifs, le radar détecte le rayonnement des hyperfréquences de faible intensité émis par tous les objets dans la nature.

Les satellites ERS (European Remote Sensing), RADRSAT-1 et bien d'autres sont équipés de systèmes radar imageurs actifs, tandis que les satellites japonais MOS (Marine Observation Satellite) sont de type passif.

Un des avantages des systèmes de détection par radar actif est qu'ils peuvent recueillir des **données en tout temps, de jour comme de nuit**, car ils sont pourvus de leur propre source d'énergie. Les capteurs passifs, qu'ils fonctionnent dans le visible, l'infrarouge ou les hyperfréquences, peuvent capter uniquement l'énergie réfléchie ou émise par la surface de la Terre. Dans notre travail, on s'intéresse aux images fournies par des capteurs actifs.

2.3.3 Systèmes radar en télédétection

Afin de comprendre comment un **système radar imageur** produit des images, il est utile de le comparer aux systèmes imageurs optiques. Les photographies, tout comme les images numérisées, sont produites par des systèmes qui utilisent le rayonnement électromagnétique dans le visible et le proche infrarouge, et sont obtenues au moyen d'une exposition instantanée. À l'opposé, les images radar sont produites par l'enregistrement des impulsions des hyperfréquences qui sont émises vers une cible et réfléchies par celle-ci, et ce, pendant une période donnée.

On peut diviser les radars de télédétection en deux grandes catégories : les antennes à **ouverture réelle**, et les antennes à **synthèse d'ouverture**.

Les antennes à ouverture réelle émettent et reçoivent des signaux dans les hyperfréquences au moyen d'une antenne de longueur fixe. Ces radars ne peuvent fournir une résolution suffisamment fine pour la plupart des applications de télédétection, tout simplement parcequ'il est difficile de transporter une très longue antenne. Dans ce cas précis, la résolution est proportionnelle à l'inverse de la longueur d'antenne.

Pour résoudre le problème des antennes à ouverture réelle, le radar SAR « (Synthetic Aperture Radar, en français antennes à synthèse d'ouverture (RSO) » a été mis au point [19]. Les SAR ont une antenne physiquement courte, qui simule ou synthétise des antennes très longues.

Donc, on peut dire qu'une longue antenne fournit une image détaillée, c'est-à-dire à

grande résolution, d'une petite région, par contre, une courte antenne donne une image moins détaillée d'une région plus grande.

2.3.4 Géométrie des images

L'angle d'incidence décrit la relation entre l'illumination du radar et la surface du sol. En terme simple, c'est l'angle entre le faisceau du radar et l'objet ciblé. Il détermine l'apparence de la cible sur une image. Un angle d'incidence local peut être déterminé pour chaque pixel d'une image. La présence d'objets (arbre, roche, édifices,...) font varier l'angle d'incidence local. Ceci génère des variations de l'*intensité du pixel*.

Les angles d'incidence des satellites varient moins que les angles d'incidence des plateformes aéroportées, car leur altitude est beaucoup plus élevée. Ceci donne une illumination plus uniforme sur les images spatiales que sur les images aériennes.

L'effet de l'incidence sur les images SAR peut se caractériser comme suit.

Sur une scène donnée, les déformations géométriques peuvent être de plusieurs types : raccourcissement, allongement, inversion ou ombrage et ce, quelle que soit l'altitude de la cible. La pente locale est le pivot de la déformation, cf. FIG 2.7. α désigne l'angle d'incidence et β la pente locale. Quatre cas peuvent surgir :

- ◇ Si la topographie est parfaitement horizontale, c'est-à-dire une pente nulle, alors quelque soit l'incidence du pulse, le rapport cible/image est conservé : la déformation est nulle.
- ◇ Si la pente locale face au pulse est inférieure à l'incidence, alors tout point haut de la topographie sera éclairé un peu plus tôt que sa base et conduira à une déformation en raccourcissement. Dans le flanc opposé au pulse, la surface est allongée.
- ◇ Si la pente locale est égale à l'incidence du pulse alors l'ensemble des cibles de la surface face au pulse vont être sommées dans une même ligne. Cela peut rendre cette surface invisible, seule la très forte énergie sera visible et induira sa présence possible.
- ◇ Si la pente locale de la face exposée au pulse est supérieure à l'incidence, la déformation géométrique va générer un basculement du flanc éclairé provoquant une inversion du relief. Dans la face opposée au pulse, ce phénomène peut générer un phénomène d'ombre ; faute d'éclairement.

Les déformations géométriques des scènes "radar" sont donc particulièrement importantes et doivent être prises en compte lors d'une interprétation d'image. Plus l'incidence est élevée, plus les déformations géométriques sont faibles et facilitent l'interprétation.

La géométrie des systèmes radar imageurs diffère grandement de celle des systèmes photographiques. Le capteur des systèmes photographiques est à visée centrale vers le nadir et présente une géométrie d'image symétrique. Cependant, les systèmes radar imageurs utilisent plutôt un capteur à visée latérale qui présente une géométrie d'image asymétrique. Pour amples informations, consulter [8].

Certains satellites visent à droite (ENVISAT), tandis que d'autres visent à gauche et à droite (RADARSAT-1 & RADARSAT-2). Le satellite ENVISAT vient compléter le programme RADARSAT-1 et assure la continuité des données entre RADARSAT-1 et

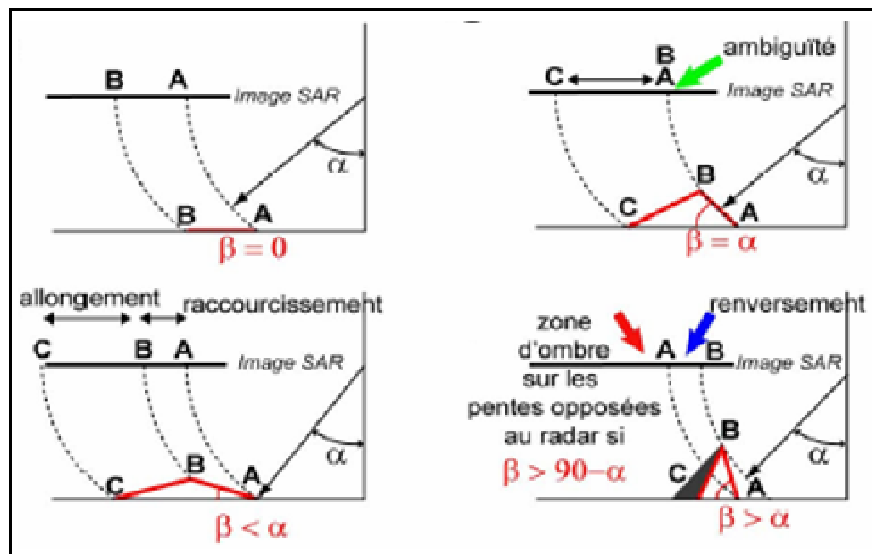


FIG. 2.7: Déformation géométrique générée par les conditions d'acquisition RADAR [20]

	RADARSAT-1	ENVISAT	RADARSAT-2
Année	1995-	2002-	2003-
Instrument	SAR	ASAR	SAR
Résolution Spatiale	10 à 100 m	30 à 1000 m	3 à 1000 m
Polarisation	HH	HH, VV, HV ou VH	Complète
Direction de visée	Droite et gauche	À droite	Gauche et droite
Enregistreur	Analogiques	Semi-conducteurs	Semi-conducteurs
Localisation	Aucun	MWR, DORIS et LRR	Recepteur GPS
Guidage en lacet	Aucun	Oui	Oui

TAB. 2.3: Comparaison entre RADARSAT et ENVISAT

RADARSAT-2. Le tableau TAB. 2.3 donne quelques éléments d'information et de comparaison entre RADARSAT et ENVISAT.

Les données fournies par ENVISAT et RADARSAT seront utilisées comme outil d'information pour servir à enrichir les connaissances actuelles en télédétection.

2.3.5 Intérêt des capteurs radar par rapport aux capteurs optiques

Les différences sont importantes entre les images radar et les photographies aériennes. La géométrie de prises de vue et les propriétés des ondes électromagnétiques sont deux raisons qui expliquent l'apparence très différente de ces types d'images. Les structures verticales apparaissent très différemment, puisque le *déplacement dû au relief se fait en sens opposé*.

Les capteurs optiques sont des systèmes passifs puisqu'ils jouent uniquement le rôle de

recepteur, et de ce fait, utilisent généralement une source lumineuse naturelle telle que le Soleil, ce qui limite leur application. Le radar a donc la possibilité de réaliser des acquisitions de jour/nuit et en toute période. Par contre, leur aspect s'éloigne des images habituellement utilisées par notre cerveau.

2.3.6 Acquisition des données

Les utilisateurs finaux commandent leurs images auprès des vendeurs d'images en spécifiant les paramètres tels que la direction de visée, le mode et la position de faisceau. Ils peuvent choisir la zone couverte, la résolution et la géométrie d'image convenant le mieux à leurs besoins. Les utilisateurs doivent choisir parmi ; deux modes de visée, sept modes opérationnels et diverses positions de faisceau pour le système ENVISAT. Ensuite, les commandes sont envoyées à l'agence spatiale qui concilie des requêtes & préparation du plan d'acquisition.

2.4 Dunes de sable

Le Sahara possède plusieurs type de zone aride, notamment les ergs. Ils sont des grands massifs de dunes de sable et évoluent en fonction des vents dominants.

2.4.1 Introduction

Les dunes de sable couvrent près d'un quart de nombreuses régions désertiques dans le monde [21]. Les dunes mobiles représentent 85% de la superficie totale de dunes de sable [22]. Les dunes fixes et semi fixes sont réparties sur la périphérie du désert et les dunes mobiles sont réparties principalement dans la partie intérieure des déserts. Dans de nombreuses zones désertiques dans le monde, les dunes de sable fixe et semi-fixe sont réactivées en raison de la collecte du combustible dans les dunes de sable des terres marginales du désert. En conséquence, les habitants des oasis sont affectés par l'invasion des dunes [23].

Les étendues de dunes ressemblent à une mer de sable dans le désert. Leurs apparences répétitives façonnées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs déplacements menacent aussi bien les villes, les routes que les zones de cultures. Nous allons présenter un type de dunes particulier appelé les *barkhanes* ou *barchanes*. Nous nous intéresserons, sommairement à leur :

- ◇ formation,
- ◇ survie,
- ◇ fixation/l'écroulement,
- ◇ et évolution.

L'information sur les attributs de dunes est très importante pour comprendre les changements environnementaux dans les régions arides. Nous le décrirons donc dans le détail.

Nous commençons par des brèves généralités sur les dunes.

Dans un deuxième temps, nous regardons les problèmes engendrés par l'évolution des dunes. Ensuite, la dune à l'échelle du grain. Puis, la partie suivante présente une vision à

l'échelle de la dune, en particulier il sera question de la vitesse de déplacement des dunes. Enfin, on essayera d'avoir une vision plus large de dunes en tant que membres d'un groupe (champs de dune).

2.4.2 Généralités

2.4.2.1 Définition

Le terme dune désigne un relief qui est composé de sable. Du fait que le sable est constitué des grains, les amoncellements de sable ont toujours les formes rondes.

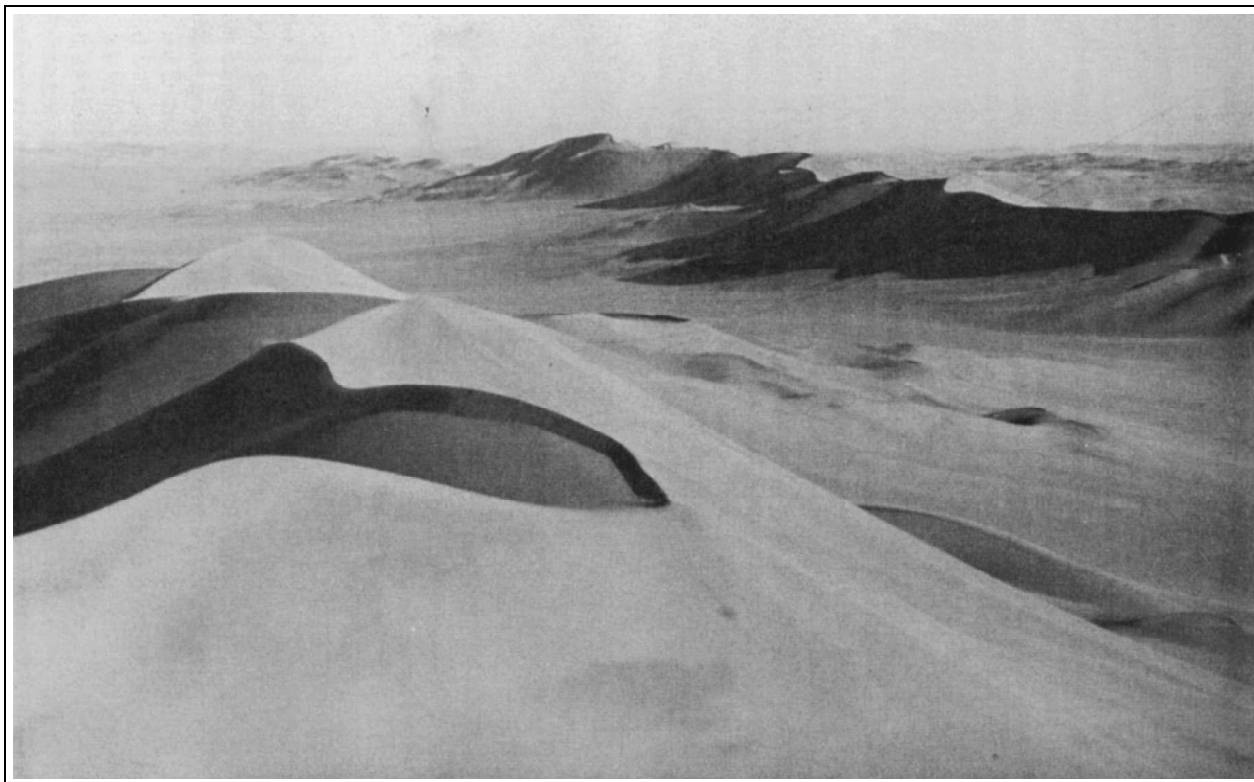


FIG. 2.8: Dunes de sable dans le désert

2.4.2.2 Différents types de dunes

C'est R.A. Bagnold [5], qui en 1941, s'est intéressé au problème de la formation, de l'évolution et de la survie de dunes.

Pour lui, il existe trois types de dunes :

À Les dunes continentales. Elles sont caractéristiques des paysages désertiques. Leurs formes varient suivant la force et la direction des vents.

Les dunes littorales. Elles résultent de l'accumulation, par le vent du sable apporté par la mer.

Les dunes hydrauliques. Elles sont formées non par l'action du vent, mais par celle du courant marin, sous la mer.

Dans ce document nous nous intéressons uniquement aux dunes continentales.

2.4.3 Les problèmes engendrés par l'évolution des dunes

Les dunes sont en perpétuelles évolutions. L'avancée des dunes, qui se fait par tempête de sable, a des causes multiples, notamment le sacrifice de l'environnement au profil du développement économique : déforestation, gaspillage d'eau, etc. Ce phénomène ne cesse de s'accroître. À titre d'exemple :

- ◊ Le désert du Sahara provoque de multiples problèmes. Il progresse à une vitesse de 8 km/an vers le sud et crée ainsi un ensablement quasi général, menaçant les rares terres irriguées.
- ◊ En Chine, le désert de Gobi¹ touche de milliers de villages et des centaines de villes. Pékin n'échappe plus à la menace.

Les problèmes provoqués par les dunes sont essentiellement dus à leur déplacement, une de solutions est donc de fixer les dunes.

De tout temps, les hommes ont du lutter contre l'ensablement, ce qui explique que les plus anciens projets connus remontent au Moyen Age. C'est au *XVIII^{me}* siècle que l'on commence à fixer les dunes. Il existe deux types de solutions :

À solutions végétales

et solutions s'apparentant plus à la physique.

À cet effet, la solution végétale reste réaliste et est plus avantageuse. Elle consiste à planter des arbres dans des endroits stratégiques. Les plantes adaptées au climat sont à utiliser afin que l'aridité du sol n'anéantisse pas les efforts consentis dans ce sens. C'est ainsi que dans certains pays de la zone sahélo-saharienne, des programmes de lutte contre l'avancée du désert ont vu le jour ; malheureusement peu sont restés actifs. Les projets, échouent couramment. Par manque d'implication ou sensibilisation des habitants environnants, mais aussi, du fait du peu de moyens mobilisés par rapport à l'étendue du site. Bien souvent, les responsables locaux n'ont pas idée de la gravité de l'avancée du désert.

Tant que le sable ne sera pas fixé par des arbres qui le retiennent, la région sahélo-saharienne continuera à être sujette à des tempêtes de sable récurrentes. Les herbes dans les steppes poussent avec lenteur surtout par temps de sécheresse et les troupeaux les broutent aussi rapidement ; ce qui limite la fixation des sols.

Les trois sections qui suivent sont largement inspirées du document de Laïc Eric. Les personnes désirant avoir plus de détails peuvent se référer à [24].

¹Vaste région désertique comprise entre le nord de la Chine et le sud de la Mongolie

2.4.4 La dune à l'échelle du grain

2.4.4.1 Séparation des grains & longueur de saut

Quand le vent frotte le sol, s'il est assez fort, il peut pousser les grains et les aspirer vers le haut pour les emmener dans des zones où un vent, plus fort, les entraîne et leur donne de la vitesse. Un grain de la surface du sol est, en général, coincé entre des grains de sable voisins. Ce grain perturbe les lignes de courant du vent, il se crée alors une dépression au-dessus de celle-ci². La force de portance résultante, lorsqu'elle est plus importante que le poids du grain, permet à celui-ci de s'envoler, cf. FIG.2.10.

Une fois les grains décollés, ils sont entraînés dans le sens du vent et retombent plus loin à cause de la gravité. La relation fondamentale de la dynamique (2.2) permet d'écrire que :

$$\tau_{saut} = \frac{V_{\perp}}{g} \quad (2.2)$$

où τ_{saut} désigne la durée du saut, V_{\perp} une vitesse verticale et g la constante du pesanteur du lieu.

La loi d'échelle qui suit la longueur de saut (l_{saut}) en fonction de la vitesse du vent (v_{vent}) est donnée par la relation (2.3) :

$$l_{saut} = \tau_{saut} * v_{vent} \quad (2.3)$$

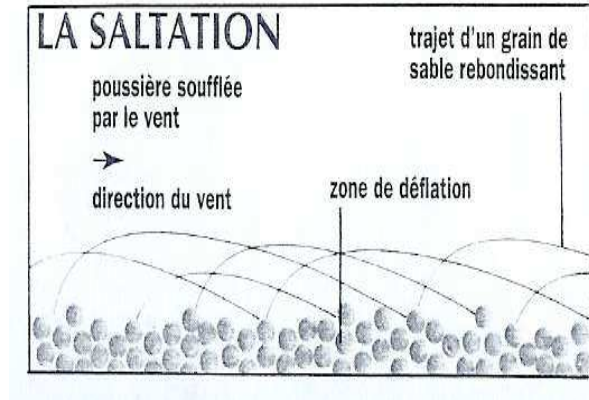


FIG. 2.9: La saltation

Une fois qu'un grain a été aspiré, il accélère jusqu'à atteindre la vitesse du fluide environnant. Cette longueur de saut dénommée l_{drag} est donnée par la relation (2.4) suivante :

$$l_{drag} = \frac{\rho_s}{\rho_f} * d \quad (2.4)$$

²Dépression de Bernoulli : à altitude égale, la pression d'un fluide diminue

où ρ_s et ρ_f sont, respectivement la densité du grain et celle du fluide porteur et d le diamètre moyen d'un grain.

Les grains de sable dans le vent ont un ordre de grandeur d'une longueur de saut $l_{drag} \approx 10^3 d$, ce qui est très différent d'autre fluide.

2.4.4.2 Saltons/reptons & flux de saturation

Lorsqu'un grain est arraché du sol par le vent, il n'atteint jamais la vitesse du vent au premier saut. En atterrissant sur le sol, il effectue un *choc élastique* et pousse d'autres grains à décoller, de façon analogue à de boules de billard. Il peut pousser un nouveau grain à effectuer un "saut" d'une distance supérieure ou égale à celle parcourue par ce grain. Le grain éjecté part avec une vitesse initiale comparable à celle qu'avait le grain incident et est accéléré par le vent. Ces grains sont appelés *saltons*. Nous constatons, cf. FIG.2.10, bien que les trajectoires de saltons sont déviés au hasard à chaque collision, les reptons sont toujours poussés vers le bas le long de la pente la plus raide.

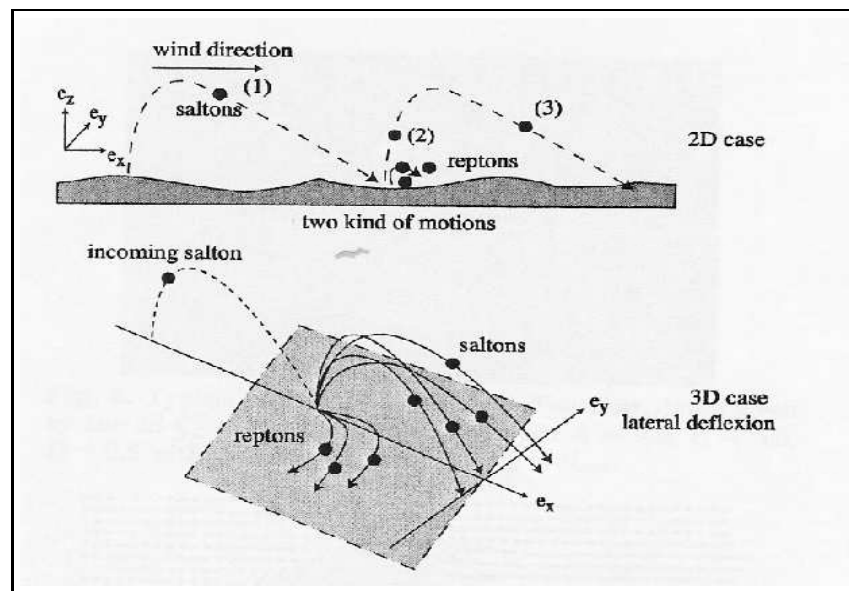


FIG. 2.10: Influence de la gravité sur des saltons & reptons

Lorsque le vent souffle plus fort, le flux de sable a tendance à augmenter. Seulement, cette augmentation se fait avec un certain retard qui est du à l'inertie des grains de sable sollicités. On a donc un processus multiplicatif mettant en évidence une distance typique l_s , mais qui possède une limite. Pour atteindre ce flux de saturation, il faut une certaine distance pour que le vent puisse se charger jusqu'à sa saturation en grains de sables.

2.4.5 La dune à l'échelle de l'individu dune

Dans cette section, nous nous plaçons à l'échelle de la dune, c'est-à-dire à l'échelle de la population des grains qui la composent.

2.4.5.1 Topologie générale de la dune

Plusieurs types de dunes existent : la barkhane, dune linéaire, dune en étoile, dune coupole, etc.

Les travaux rencontrés dans la littérature ont montré que les dunes ont une forme en *croissant*, on appelle de telles dunes des barkhanes (barchanes ou demi-lune).

Le déplacement des barkhanes est un obstacle considérable pour les activités humaines. Elle est la plus étudiée, pour deux raisons principales [25] :

- À cause de sa vitesse de déplacement (50-60 mètres par an),
- et à cause de sa simplicité par rapport à l'entière forme dunaire.

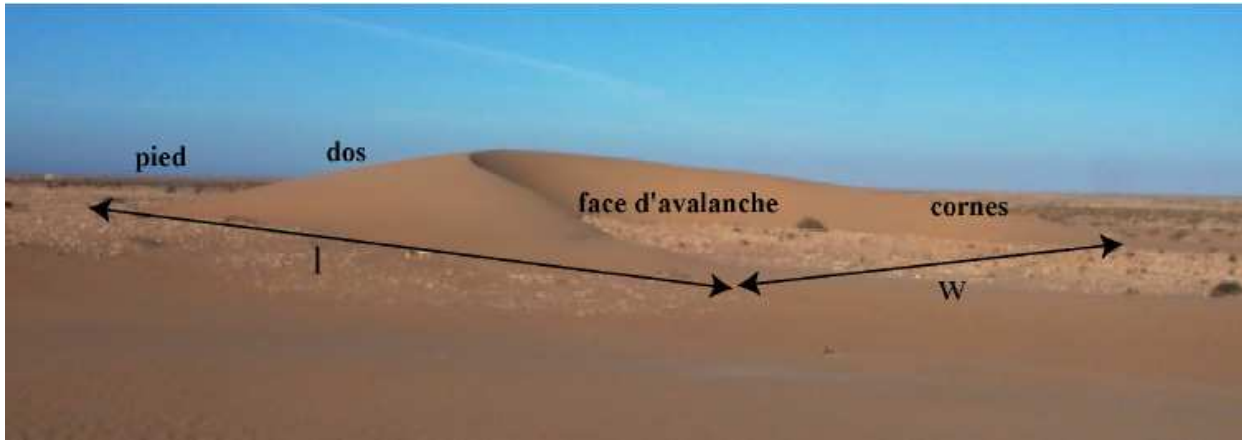


FIG. 2.11: Une barkhane dans le désert[24]

Les barkhanes présentent deux cornes dans la direction du vent. Régardées de côté, elles sont de faible pente avec un rapport d'aspect : hauteur/longueur de l'ordre de 1/10 [24].

Les relations linéaires liant ces différentes longueurs caractéristiques expliquent en partie l'existence des dunes dans le désert. En effet, une dune ne peut prendre de la longueur sans que sa hauteur soit changée (respectivement la largeur) et réciproquement.

2.4.5.2 Les avalanches

Le cisaillement qu'exerce le vent sur le sable à la surface de la dune génère l'écoulement du sable. Cet écoulement, étudié en détail par le brigadier britannique Bagnold [5] pendant et après la seconde guerre mondiale, s'effectue sous trois formes :

- À suspension des petits grains, inférieurs à 50 microns,

la « reptation » pour les grains les plus lourds,
 et la « saltation » où les grains suivent une trajectoire.

L'écoulement de surface par saltation correspond à une valeur dont les expressions empiriques sont vérifiées dans des souffleries [26],[27]. Mais le processus entier de la saturation n'avait jamais été pris en compte avant le travail de Sauermann [28].

2.4.5.3 La dune minimale

Une dune peut avoir une certaine taille pour ne pas disparaître. Elle peut fondre ou mourir de "faim". Au regard des résultats de [24], on constate qu'aucune barkhane de moins d'un mètre de haut et d'environ 15-20 mètres de longueur n'a été observée. Cette nouvelle échelle d'espace peut être expliquée par l'existence de la longueur de saturation introduite dans la section 2.4.4.2. En effet, lorsque le vent souffle sur la dune, au fur et à mesure qu'il monte sur la dune, il accélère et se charge en sable, érodant ainsi le dos de la dune. Arrivé au sommet de la dune, le vent retrouve plus d'espace et ralentit alors. Or, en ralentissant, si celui-ci est saturé en sable, il emporte alors plus de sable qu'il ne peut le faire et **relâche donc le sable** sur la partie aval de la dune. C'est par ce mécanisme qu'avance la dune, cf. FIG. 2.12.

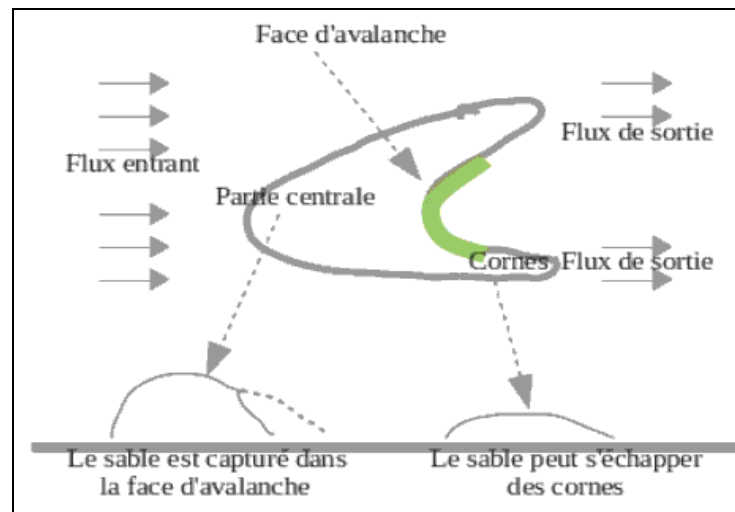


FIG. 2.12: Vent soufflant sur une dune

Cependant, si la dune n'est pas assez grande pour permettre au vent d'atteindre son flux de saturation, en arrivant au sommet de la dune, le vent ne va quasiment pas relâcher de sable puisque malgré son ralentissement, et il a suffisamment d'énergie pour conserver en l'air la majorité du sable ramassé sur le dos de la dune. Dans ce cas, **la dune perd constamment du sable** et se met à fondre. En devenant plus petite, elle va perdre encore plus de sable et finir par disparaître. C'est la preuve de l'existence d'une taille critique minimale pour la dune, en dessous de laquelle elle devient inévitablement instable et finira par disparaître.

Pour subsister, la dune a donc besoin d'un apport extérieur. Il faut que le vent incident soit déjà en parti chargé de sable pour que la dune puisse le capter et compenser ses pertes.

Au regard de cet aspect, l'on compare parfois la dune à un système vivant. Une dune trop petite, perd plus de sable qu'elle n'en capte par ce mécanisme et fond alors inexorablement. À l'inverse, si la dune est trop grande, elle capte plus de sable qu'elle n'en perd et grossit encore plus. Sa section efficace devenant de plus en plus grande, elle continue donc de grossir indéfiniment.

La question qui vient à l'esprit, c'est *comment fait une dune pour apparaître* ? Il y a, en réalité deux causes principales :

À Tout d'abord, les défauts topologiques peuvent se comporter comme une « pseudo-dune » par leur forme et être l'initiateur d'une dune.

La seconde cause provient des tempêtes. En effet, lors d'une tempête, le vent est chargé de sable. Lorsque celle-ci se calme, la vitesse tombe en dessous d'une vitesse critique, le vent n'a plus alors assez d'énergie pour porter l'ensemble des grains et du sable se redépose.

Dans le même ordre d'idée, *pourquoi n'observe-t-on pas uniquement des dunes géantes dans le désert* ? Il y a une raison principale à cela :

À Au cours de l'année, les vents changent en intensité et en direction et parfois même des tempêtes apparaissent, ce qui permet de redistribuer le sable et la taille des dunes.

2.4.6 La dune à l'échelle du champ de dune

Dans l'optique de faire des hypothèses dans la détection de changement dunaire à partir d'images satellite, nous essaierons de comprendre, dans cette section, comment les dunes interagissent entre elles pour constituer des grandes étendues : **les ergs**. Nous envisageons la dune à l'échelle du désert ou la capacité en sable peut être considérée comme illimitée.

2.4.6.1 Longueur d'écrantage

Dans un champ de dune, le flux de sable incident d'une dune correspond au flux sortant d'une autre dune en amont. Or, la distribution de flux de sable en aval d'une dune est inhomogène. Cela s'explique physiquement par le fait que la hauteur de la dune n'est pas constante. Ainsi, en suivant le mécanisme décrit en 2.4.5 page 30, les parties les moins hautes se déplacent, mais le flux de saturation n'étant pas atteint, le flux sortant y est plus important.

La longueur d'écrantage λ_p , cf. FIG.2.13 (a), peut être obtenue dans l'hypothèse d'un champ de dunes de taille uniforme égale à w_α et de densité surfacique N_α par la relation (2.5) :

$$\lambda_p = \frac{1}{N_\alpha w_\alpha} \quad (2.5)$$

On peut voir λ_p , comme un libre parcours moyen [24]. λ_p s'interprète comme la distance minimale entre deux dunes pour être sûr que la dune en aval soit alimentée de manière à ce qu'elle survive.

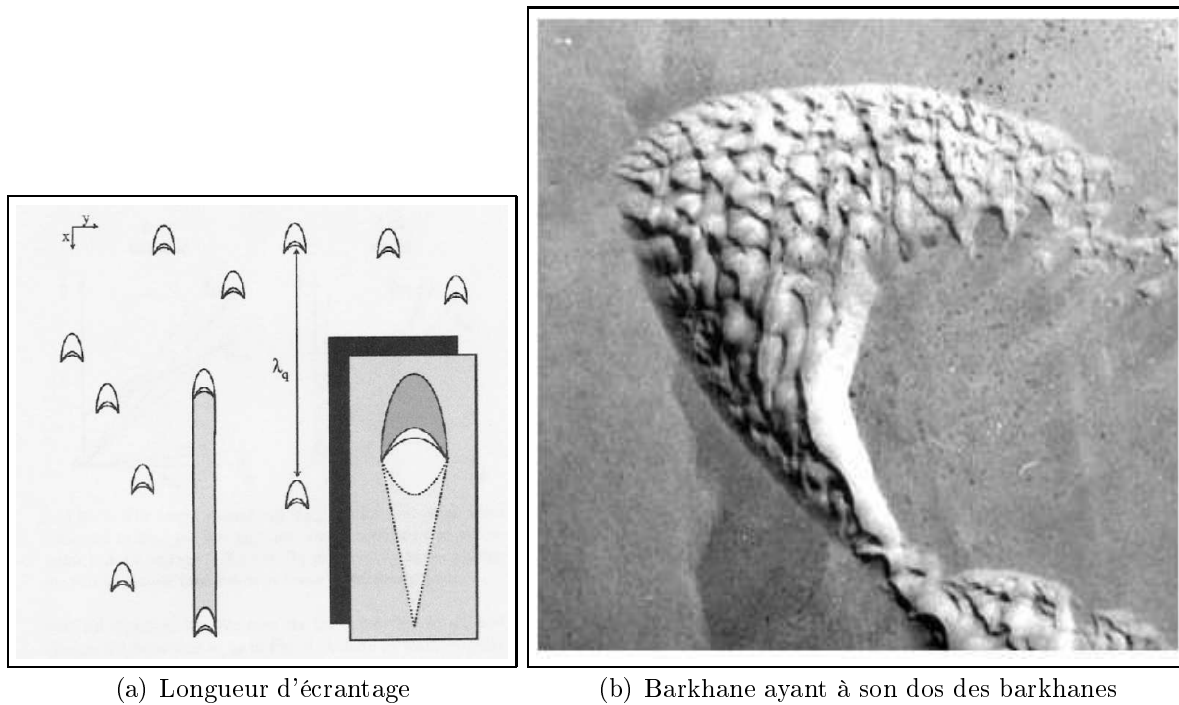


FIG. 2.13: Longueur d'écrantage & une mega-dune [24]

2.4.6.2 Existence des corridors

L'expérience sur le terrain montre que les barchanes ne sont pas isolées mais intégrées dans des structures de plus grandes échelles : *les couloirs de dunes* [24]. A l'intérieur de ces couloirs, les barchanes se déplacent, interagissent avec leurs voisines directes, fusionnent et disparaissent. Ces couloirs s'étendent selon la direction dans laquelle le vent souffle.

Un constat fait³, a été qu'au sein d'un *même couloir*, la dispersion des tailles des barchanes est relativement étroite : *la gamme des tailles des barchanes va seulement du simple au double*.

De plus, il a été observé sur le terrain que d'un *couloir à l'autre* la densité de dunes ainsi que leur répartition de taille varient considérablement : *souvent d'un facteur 5*.

2.4.7 Les déserts, la détection de changement et les dunes

Si nous intéressons aux changements sur des zones de désert, nous constatons qu'il existe deux types d'événements immédiatement intéressant. Le premier concerne les changements ponctuels et le deuxième concerne le mouvement des sables. Ces deux types de changement peuvent se confondre dans les zones de sable mais les échelles de ces changements ne sont pas les mêmes. En effet, les déplacements de dunes sont de l'ordre de dizaines de mètres pour les dunes alors que les changements induits par un déplacement humain engendreront de perturbation de l'ordre du mètre. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur

³L'étude sur le terrain

l'étude des mouvements de dunes, en prenant en compte la direction de vent.

Les dunes de sable sont le résultat du mouvement du sable engendré par le vent. Quand ce dernier souffle au-dessus d'une vitesse minimale, les irrégularités du terrain créent des zones de dépressions qui aspirent les grains de sable. Une fois décollés, ceux-ci sont accélérés par le vent et retombent dans la prochaine zone de surpression, cf : 2.4.4.2, page 29.

La roche sous jacente étant irrégulière, l'effet décrit dans le paragraphe ci-haut se produit alors et du sable s'accumule sur les formes exposées aux vents dominants. Celles-ci finissent par être recouvertes de sable et des dunes commencent à se créer. Comme pour tout écoulement de liquide, le vent est plus rapide dans les restrictions. Une fois que les dunes ont atteint des tailles importantes et proches, le phénomène de déplacement prend le pas sur la tendance à l'absorption et, sauf changement important de climat, le phénomène devient régulier [29].

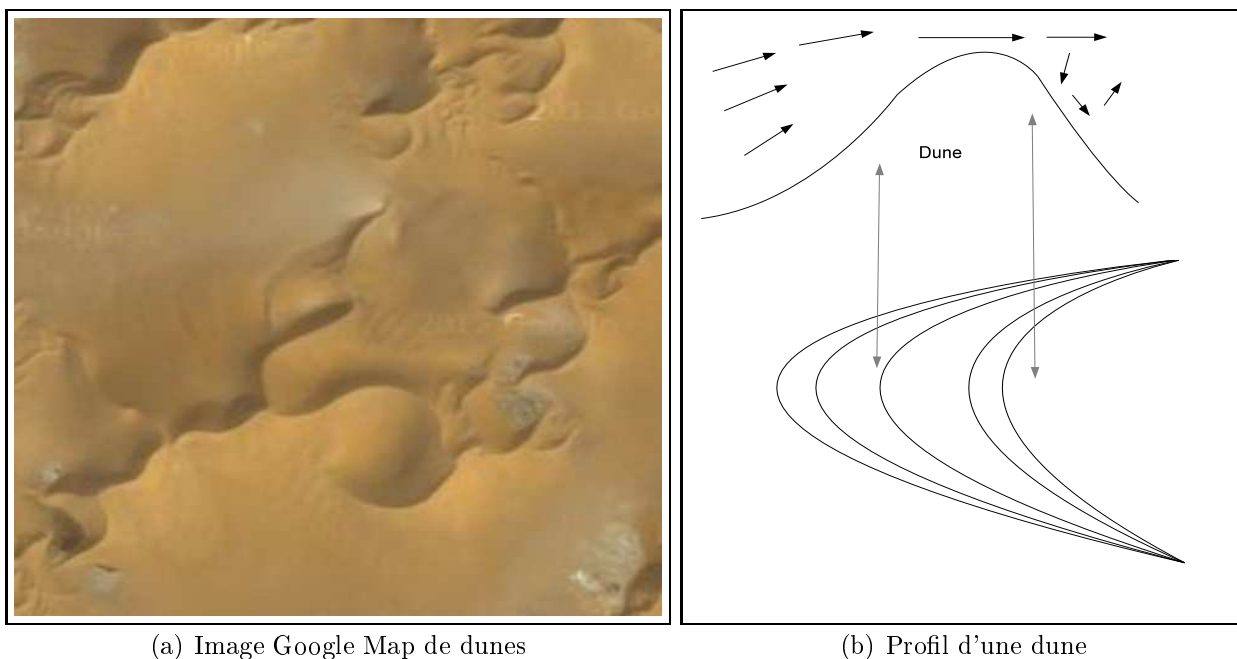


FIG. 2.14: À gauche, une image optique de dunes du Tchad et à droite une représentation du profil d'une dune . Les flèches indiquent la vitesse et la direction du vent. En bas de la figure de droite une représentation de barkhane

Il peut exister plusieurs formes de dunes, mais si le vent est régulier en direction, comme dans le Tibesti, une classe particulière de dunes a tendance à devenir majoritaire [30] les *barkhanes*. Ces dunes particulières ont une forme en croissant dont les pointes sont orientées dans le lit du vent dominant et constituent à terme des motifs comme ceux que nous pouvons observer sur la figure FIG. 2.14. Cependant, il existe également des formes dégénérées de celles-ci qu'on peut remarquer dans le désert. Ces dunes ont un profil vertical arrondi du côté du vent et une forme plus rectiligne de l'autre côté. Cette forme permet d'expliquer l'aspect des images radar du désert qui est l'objet en partie de notre problématique.

2.4.8 Conclusion

L'étude de régions désertiques en général et celle des zones de dunes en particulier est un problème intéressant pour le suivi de notre environnement mais également pour des applications d'exploration d'autres planètes [31]. Les enjeux, pour les déserts terrestres, sont aussi bien ponctuels (application sécuritaire, recherche des personnes en détresse) que globaux (suivi de déplacement de dunes pour la protection de voies de communications, la prévention des zones cultivables mais aussi contre l'avancée du désert).

La sécheresse qui sévit dans la région sahélo-saharienne provoque la détérioration de la végétation, entraînant avec elle des tempêtes de sable. Le vent de sable se déclenche facilement quand le sol est dépourvu de toute végétation qui le fixe et quand le vent souffle assez fort pour l'emporter.

La dune est constituée de différentes parties et évolue selon des facteurs extérieurs (vent/obstacle) qui modifient sa forme, sa vitesse et son caractère (fixe/mobile). En cas de progression de la dune, celle-ci engendre des problèmes pour les populations environnantes ; ce qui oblige l'homme à s'adapter et trouver une solution pour freiner l'avancée de la dune.

2.5 Travaux en télédétection et les déserts

Les caractéristiques des dunes telles que l'espacement des dunes et la hauteur sont très régulières dans les déserts. Elles manifestent un motif périodique du point de vue distribution spatiale. Il existe plusieurs fonctions de transfert de modulation entre les images SAR, les paramètres réels de surface périodique et la luminosité de l'image qui est sensible à l'angle d'incidence local [32]. Selon des études antérieures, un processus de cartographie linéaire peut décrire ces processus de modulation.

Qong [32] avait proposé un algorithme pour l'estimation des caractéristiques de dunes linéaires, y compris (la direction des vents dominants), l'espacement interdunaires, la pente et la hauteur de dunes à partir d'images SAR. Pour estimer la pente, deux algorithmes ont été développés : une méthode d'angle d'incidence locale et un procédé de modulation de fonction de transfert. La hauteur des dunes linéaires a ensuite été calculée sur la base de la pente de la surface.

Le désert du Sahara, est le plus grand désert au monde, occupant ainsi plus de huit (08) millions de km^2 et touche dix (10) pays⁴ dans le continent africain, notamment le Tchad.

Le désert du sahara a fait l'objet de nombreuses études [33]. Les données de télédétection provenant du visible, proche et infrarouge ont été utilisées. En particulier, les données SAR, dans de nombreuses études de dépôts éoliens. Par exemple [34], [35] et [36] ont examiné et étudié la rétrodiffusion radar à partir de dunes du sable et la relation entre le terrain et les configurations radar, telles que la variation de l'angle et la longueur d'onde. Blumberg [37] a étudié la morphologie par le vent dans les environnements désertiques en utilisant des données polarimétriques SAR. L'accent mis par Muthar Qong [32] porte sur la rétrodiffusion radar de la surface des dunes linéaires pour en extraire les attributs tels que la hauteur

⁴Algérie, Égypte, Libye, Mali, Maroc, Mauritanie, Niger, Soudan, Tchad et la Tunisie

des dunes, l'espacement interdunaire, et la direction des dunes. Les dunes linéaires sont caractérisées par leur longueur, leur hauteur, leur parallélisme et leur espacement régulier [21]. Par conséquent, elles manifestent un motif périodique en termes de distribution spatiale. Ces surfaces périodiques sont la forme dominante dans des nombreuses régions du désert.

De nombreuses études sur des surfaces périodiques telles que les vagues de la mer ont été réalisées. Ce type de surface périodique peut être imagée par le système SAR, et de nombreuses fonctionnalités d'onde de la mer, y compris la hauteur et les écarts de pente, ont été obtenus à partir de ces études [38], [39], [40] et [41].

Les caractéristiques topographiques de dunes linéaires sont très semblables à celles de vagues de la mer en termes de leur répartition spatiale instantanée [42]. Il est donc possible d'utiliser la fonction de transfert de modulation (MTF) entre les vagues de la mer et le spectre de l'image SAR, sous certaines conditions [43] et [44]. Dans certains cas, ces informations peuvent être utiles pour l'interprétation des images SAR d'autres planètes qui ont du relief comme Venus.

2.5.1 Formation des images SAR

Les images de télédétection proviennent de la mesure de la réflexion de la lumière captée par un système permettant de construire une matrice de pixels donnant une représentation d'une parcelle de terrain. Le rayonnement capté peut être dans le domaine visible. Il peut également provenir de tous les autres domaines du spectre électromagnétique dont le domaine des ondes radar. Dans ce domaine, les capteurs sont actifs ou passifs suivant qu'il possède un émetteur radar ou s'il se contente de mesurer le rayonnement propre de la terre.

Notre étude exploite les données de capteurs radar actif, appelés radar à synthèse d'ouverture. Ceux-ci sont particulièrement intéressants car, tout en fournissant une géométrie d'images proche des images du domaine visible, ils ont une très grande sensibilité à la géométrie du terrain, ce qui est très précieux dans un environnement complètement minéral et donc très uniforme. En outre, les longueurs d'onde des radars à vocation cartographique sont en général choisies pour traverser les nuages sans atténuation notable et donc ont des capacités tout temps intéressantes. Les ondes radar étant polarisées, les images sont, par contre, affectées d'un très fort bruit appelé speckle. Celui-ci complique toute analyse à base d'images radar. Une description complète de la formation de ses images est fournie dans la thèse de Gouinaud [45]. Nous nous limiterons donc ici aux caractéristiques intéressantes pour l'imagerie des déserts. Dans notre étude, nous avons choisi d'exploiter des images radar satellitaires qui ont l'avantage de couvrir de vastes zones avec des pixels de l'ordre de la dizaine des mètres. Un exemple d'image est donné sur la figure FIG. 2.15.

L'intensité moyenne des pixels d'une image radar dépend principalement de la nature diélectrique du terrain et de sa forme. Dans le cas des déserts, le premier paramètre varie très peu dans une zone donnée parce que tout est uniformément sec et qu'il n'y a pas ou très peu de végétation. Alors, les effets dûs à la forme de la surface vont dominer. Dans le cas de sol de forme convexe, l'intensité de l'image est proportionnelle à la surface interceptée par le radar et dépend donc en cosinus de l'angle entre la normale à l'antenne du radar et la normale à la surface interceptée par le faisceau.

Dans le cas d'un sol concave, la valeur de I varie très brutalement ce qui conduit à des

valeurs extrêmement brillantes entourées de zones sombres. Afin de mieux comprendre cet effet, nous montrons sur la figure 2.15(a) une vue du terminal 1 de l'Aéroport Roissy-Charles de Gaulle.

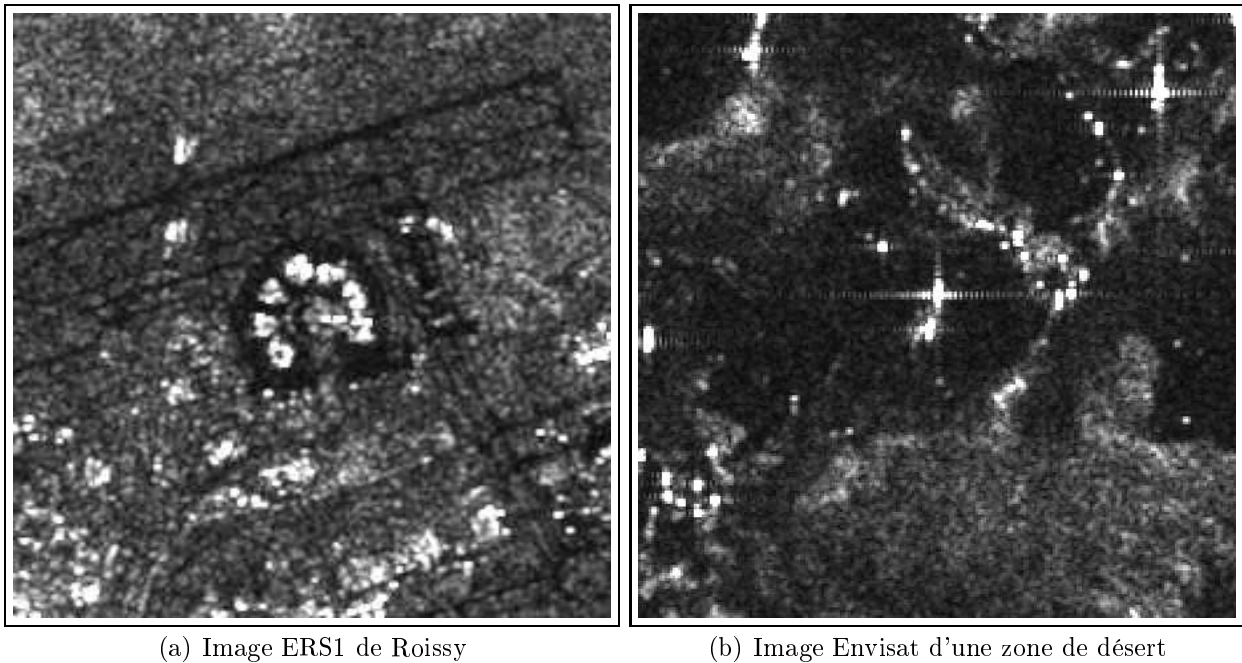


FIG. 2.15: À gauche (a) une vue du terminal de l'Aéroport Charles de Gaulle, à droite (b), image Envisat d'une zone de désert

Dans la suite, ces effets directionnels vont nous permettre d'expliquer l'aspect des images de désert et d'en tirer ensuite des méthodes aptes à atteindre notre but.

2.5.2 Imagerie SAR des dunes

La rétrodiffusion des zones de type sableuse est principalement due à la forme des dunes et des vaguelettes qui s'y forment à cause du transport du sable par les vents. Ces formes font qu'il existe forcément une partie de la forme qui est orientée vers le radar, avec une pente proche de 30 degrés, ce qui donne des signaux de trois formes distinguables :

À Les parties des dunes convexes vont donner des images avec des pixels de valeur moyenne variant essentiellement avec la valeur de la pente locale.

Des parties des dunes vont se retrouver dans des zones d'ombres portées qui vont donner un signal très faible marqué par un bruit gaussien.

Certaines parties concaves vont se retrouver avec un signal important générant des pixels ayant de très grandes valeurs, ces valeurs peuvent aussi disparaître très brutalement par une petite différence de géométrie.

Quand on observe l'image de la figure 5.32(b), nous constatons que sur les zones de dunes nous avons une bonne probabilité d'avoir un signal générant un point brillant dans l'image. L'image donne, comme prévu, une succession de zones claires et sombres parsemées de points

brillants. L'échelle de l'alternance de ces zones est basée uniquement sur les dimensions des dunes.

Nous allons maintenant, en nous appuyant sur ces différentes informations, nous intéresser aux déplacements des dunes par diverses techniques permettant de retrouver leurs formes et de les suivre. Ces techniques sont mises en oeuvre dans le chapitre 5.

2.5.3 Analogie entre les vagues de la mer et les dunes linéaires

Comme les vagues de la mer, certains dépôts éoliens des dunes linéaires orientées dans des directions constantes, leur taille et leur espacement interdunaire sont très réguliers dans les déserts. Les dunes linéaires se forment le long du vecteur vent résultant [21] et [37]. Elles sont allongées et souvent supérieures à 20 km de long.

Il existe plusieurs variétés de dunes linéaires : les dunes linéaires simples, composées et complexes. La plupart des dunes linéaires simples sont de 2 à 30 m de haut, avec un espacement interdunaire de 30 à 500 m. La morphologie du profil est asymétrique. Avec le vent, la pente étant longue, descendante, et douce, sous le vent la pente étant raide et courte.

Généralement, les bords de dunes linéaires sont recouverts par des ondulations éoliennes. Les ondulations du vent typique ont une longueur d'onde de 50 à 200 mm et l'amplitude de 5 à 10 mm [21]. Ce phénomène est semblable à beaucoup des ondulations éoliennes se superposant sur une grosse vague sur la surface de la mer. Ainsi, pour des hauteurs de vague de 5 à 10 mm, la surface du sable va apparaître lisse en bande C.

2.5.4 Mécanisme d'imagerie des dunes linéaires

Les flux de grain de sable sont formés par des dépôts d'avalanche de grains en chute sur les bords des dunes, qui sont plus accentués au-delà de l'angle de repos (34°) de sable sec [36], [21]. L'angle de sable actif de dunes au repos ne dépasse que rarement cette valeur. Par conséquent, la rétrodiffusion radar à partir d'une dune est possible à angle d'incidence inférieur à (35°) où il y a un potentiel pour une pente de dune normale au faisceau radar incident. Cependant, de nombreuses zones de petites facettes qui ont des angles de pente différents des angles au repos sont superposées sur les bords des dunes. Ces petites facettes apparaissent comme des tonalités dans les images SAR à cause des différentes conditions des rétrodiffusions. Des études plus détaillées de la rétrodiffusion des terrains éoliens sont données dans [34] et [35].

Il faut souligner au passage que Qong [32] a établi que pour un spectre de la surface périodique centré sur un nombre d'onde k , il existe une linéarité entre la hauteur (h), espacement dunaire (λ_0) et l'angle de la pente (θ_r). L'auteur est arrivé à montrer la relation suivante :

$$\frac{tg\theta_r}{h} = \frac{|k|}{4} = \frac{\pi}{2\lambda_0} \quad (2.6)$$

Il y a eu très peu d'étude portant sur l'extraction de caractéristiques des dunes linéaires, y compris la direction de dunes, la pente et la hauteur à partir d'images RSO. Qong [32] a présenté une étude préliminaire sur des sujets pertinents et d'un cadre général pour

l'estimation des caractéristiques de dunes linéaires à partir d'image RSO.

2.6 Recalage des données

La fusion de données acquises à des instants différents ou provenant des capteurs distincts, nécessite au préalable un recalage avant tout type de traitement. Ceci, dans l'optique de fournir, des méthodes automatiques de détection de changement assez fiables. La détection de changement obtenue à partir de deux images satellitales repose sur une même scène d'études.

Afin de faciliter la lecture de cette section, on se donne au préalable deux définitions simplistes.

Recalage : le recalage est une technique utilisée en traitement d'image. Il consiste à la mise en correspondance d'images, ceci dans le but de pouvoir combiner ou comparer leurs informations respectives. Cette mise en correspondance se fait à travers une transformation géométrique permettant aisément de passer d'une image à une autre.

Amer : Un amer est un point de référence fixe et identifiable sans ambiguïté.

À l'origine il est utilisé pour la navigation maritime. Un bon point d'amer doit pouvoir être reconnu sans trop de gymnastique et être situé sur l'image.

2.6.1 Critère de choix

L'approche du recalage consiste à optimiser un critère de similarité entre les deux images de la même scène. Ce critère est fonction de la transformation choisie. En réalité, trois choix importants sont à distinguer [46] :

À critère de similarité

- (a) différence d'intensité,
- (b) distance entre éléments caractéristiques (surfaces, bords,...),
- (c) information mutuelle /entropie,...

transformation utilisée

- (a) affine : transformation linéaire (homothétie, rotation) et de translations,
- (b) élastique : champ de déplacement plus ou moins régulier,
- (c) rigide : translation et rotation.

méthode d'optimisation

2.6.2 Algorithmes de recalage

Dans la littérature, il existe plusieurs catégories d'algorithme de recalage : recalage de contours/surfaces, recalage s'appuyant uniquement sur l'intensité, recalage 2D-3D et notamment le recalage à base d'amers. Le Principe de l'algorithme de recalage est simple à comprendre.

Cependant, en ce qui nous concerne la superposition d'images se fait via un modèle de recalage polynomial utilisant des points d'amers. En effet, notre objet étant la recherche de changement, le recalage est un problème secondaire où une méthode manuelle est acceptable.

2.6.2.1 Principe de l'algorithme à base d'amers

Il s'identifie en trois points :

- À identification d'un ensemble de points correspondants dans les deux images,
- identification manuelle de points semblables significatifs, ou bien marquage avant acquisition et identification automatique, et
- pour une transformation rigide, trois (03) points non alignés suffisent mais en pratique plus de points réduisent les erreurs de marquage.

2.6.2.2 Algorithme rigide à base d'amers

C'est un algorithme simple, basé sur des ensembles de points.

En gros, le principe de l'algorithme rigide à base d'amers se résume en quatre étapes :

- À On se donne deux ensembles source "S" et cible "C", définis par :
 - $S = \{S_i\}, i=1,2,..n$
 - $C = \{C_j\}, j=1,2,..m$

On calcule les barycentre B_S et B_C des deux ensembles de points.

Le vecteur $\overrightarrow{B_S B_C}$ donne la translation t .

La rotation est alors celle qui optimise (minimise) la somme des carrés des distances entre points correspondants.

2.6.2.3 Logiciels utilisés

Pour nos travaux, on se sert de deux logiciels *xcrecal* et *rec_ima16* (respectivement *rec_ima*), développés par C. Gouinaud [47]. Ces deux logiciels servent à recaler les images avant de procéder à un éventuel traitement en vue d'une expérimentation.

Le programme *xcrecal* permet de repérer de façon interactive des points d'amers (référence) entre deux images et d'évaluer par rapport à certain modèle de déformation les possibilités de redressement. Les modèles disponibles actuellement sont des polynômes de degrés quelconques en x et y. Les résultats de *xcrecal* sont des fichiers d'amers et peuvent être exploités par des programmes externes tels que *rec_ima16*.

Le but de *rec_ima16* (respectivement *rec_ima*) permet de recaler les images sur lesquelles on a pris les points d'amers à l'aide de *xcrecal*.

xcrecal et *rec_ima16* exploitent le format d'images du laboratoire Image de Télécom-Paris (.dim & .ima) pour ce qui est des images et des masques, les fichiers statistiques sortent dans un format type texte dont les champs sont séparés par des points virgules. Les *fichiers de points d'amers* et de vecteurs sont des fichiers au format texte.

2.7 Méthodes de comparaison d'images

La comparaison d'images a un aspect important dans plusieurs domaines. Souvent, le choix d'une démarche pose problème. Une méthodologie convenable joue un rôle central pour une éventuelle détection des changements. La qualité des résultats dépend fortement de nombreux autres facteurs ; l'expérience de l'analyste, la complexité du relief, les corrections radiométriques apportées aux images, etc. Quelques auteurs arrivèrent souvent à des conclusions différentes et même controversées sur l'efficacité des méthodes utilisées [48].

Afin de pouvoir profiter des séries temporelles des données SAR, la géométrie des images multi-dates doit être telle que la superposition pixel à pixel soit très bonne. C'est pour cela qu'avant d'aborder les différentes méthodes de détection de changements multi-dates, présentées au chapitre 5, une présentation de l'étape de superposition géométrique est nécessaire.

2.7.1 Superposition d'informations

Les corrections géométriques sont des processus numériques qui consistent à transformer une image brute de telle manière que cela soit superposable avec une autre image.

Les données utilisées peuvent être d'origine et de types différents. Ces informations sont extérieures au domaine "télédétection", assujetties à la restitution cartographique et à la superposition.

L'acquisition d'information, pour un éventuel traitement fiable requiert deux phases au préalable :

À La restitution cartographique est réalisée pour une donnée image ou « spatialisée », suivant un type de projection et à une échelle déterminée. Les problèmes matériels, liés au mode de représentation, sont très importants pendant cette phase de restitution.

La superposition des données est réalisée principalement pour des images satellitaires, obtenues à partir de couple *vecteur* (satellite) et *capteur* (radiomètre), de résolutions spatiales et temporelles pouvant être très différentes.

La maîtrise de cette superposition est un préambule à l'utilisation des données satellitaires, ou contrairement au géostationnaire, aucune image d'une même zone n'est superposable directement avec une autre donnée de même source [49].

En ce qui nous concerne, nous partons des deux images satellites d'une même scène. Ces images sont superposables, sinon on recale l'une dans l'autre avant de passer à un quelconque type de prétraitement. Ainsi donc, pour répondre à la problématique de mon sujet de thèse, différents types de prétraitements ont été présentés dans le chapitre 5.

2.7.2 Revue des méthodes existantes

De nombreuses méthodes ont été développées pour la détection de changements en imagerie satellitaire. Cependant, les méthodes évoluent rapidement. Des nouvelles méthodes sont développées afin de répondre au besoin croissant, réel et complexe de la surface de la

Terre. À ce titre, bon nombre d'auteurs ont publié des évaluations des méthodes de détection de changements Thi Thanh PHAM, F. BONN et Jean-Marie DUBOIS [50].

Selon Thi Thanh [50], Lu et ses collègues [51] décomposent les méthodes de détection de changements en six (06) catégories : algébriques, de transformations, de classification, avancées, approche SIG, d'analyse visuelle, et autres techniques, cf. TAB.2.4, page 43.

Pour fournir une idée globale sur ces méthodes de la littérature, nous utilisons la revue bibliographique de Lu [51], à partir de laquelle les avantages et inconvénients de chaque catégorie de méthodes sont synthétisés.

2.7.2.1 Méthodes algébriques

Elles utilisent des algorithmes algébriques (division, soustraction, ...) et un seuil pour identifier les zones de changements.

- ◇ Points forts : elles sont simples, exceptée celle de vecteur de changements. Elles permettent la réduction de certains effets atmosphériques et radiométriques.
- ◇ Points faibles : elles ne fournissent aucune information sur la nature des changements, hormis la méthode de vecteur de changements. Cependant, elles exigent un seuillage.
- ◇ Contraintes : elles exigent l'identification de seuils et le choix de bandes spécifiques pour la détection.

2.7.2.2 Méthodes de transformation

Elles appliquent les transformations comme l'analyse en composantes principales, La Tasseled Cap et le Khi-carré.

- ◇ Points forts : elles sont plus complexes que les méthodes algébriques, mais accessibles. Elles réduisent les informations redondantes entre les bandes et il y a une possibilité d'utiliser plusieurs bandes à la fois pour la détection de changements.
- ◇ Points faibles : il est assez difficile d'identifier les changements détectés.
- ◇ Contraintes : l'analyste/interpréteur doit posséder une bonne connaissance pour le choix des composantes et des seuils.

2.7.2.3 Méthodes de classification

- ◇ Points forts : elles réduisent les impacts de l'environnement, fournissent des informations concernant la nature de changements, sauf les méthodes d'analyse spectrale temporelle de détection non dirigée. Cependant, elles produisent une bonne détection.
- ◇ Points faibles : elles exigent beaucoup de temps et les changements sont difficiles à identifier.
- ◇ Contraintes : elles exigent entre autres, une réalité de terrain, l'identification de seuils, une grande exactitude de la classification et une qualité d'échantillons d'entraînement suffisants.

Catégorie	Techniques
Algébrique	Analyse par vecteur de changement Différence d'indices de végétation Soustraction d'images de base Régression d'images Différence d'images Division d'images
Transformations	Analyse en composantes principales(ACP) Transformation Tasseled Cap Gramm-Schmidt Khi-carré
Classifications	Détection du maximum de probabilité Détection de changements non dirigée Comparaison de post-classification Détection de changements hybride Analyse spectrale temporelle Réseaux de neurones
Méthodes avancées	Méthode de paramètres biophysiques Modèle de réflectance de Li-Strahler Modèles de mixage spectral
Approche de SIG	Méthode d'intégration de SIG et de données de télédétection
Analyse visuelle	Interprétation visuelle d'image
Autres techniques	Combinaison de trois indicateurs : indices de végétation, température de surface et structure spatiale Méthode de génération de superficie(area production method) Système d'observation basée sur la connaissance Approche basée sur le théorème de courbe Méthode basée sur la statistique spatiale Mesure de dépendance spatiale Approche basée sur la structure Modèles linéaires généralisés Courbe de changements

TAB. 2.4: Classification des méthodes de changements [50]

2.7.2.4 Méthodes avancées

Elles sont appliquées pour la détection de changements des paramètres biophysiques/la végétation :

- ◇ Points forts : elles fournissent de l'information précise et détaillée sur la nature de changements ;
- ◇ Points faibles : elles sont complexes et non disponibles dans des logiciels
- ◇ Contraintes : elles exigent le développement de modèles de cime d'arbres et d'estimation des paramètres biophysiques ainsi que l'identification de composantes spectrales homogènes et de seuils adéquats.

Aucune de ces méthodes n'a été retenue dans plusieurs papiers de la littérature, à cause de leurs particularités et leurs inconvénients.

2.7.2.5 Approches de SIG

Elles utilisent les données multisources, telles que les cartes topographiques et thématiques.

- ◇ Points forts : elles permettent d'insérer des données auxiliaires pour l'analyse et l'interprétation des résultats. Elles permettent aussi, la mise à jour dans un SIG.
- ◇ Points faibles : potentiellement, l'exactitude des résultats finaux de la détection des changements sont diminués. En effet, lorsque des données viennent de différentes sources, si un des documents est cartographiquement moins précis ou s'ils sont à différentes échelles, l'exactitude globale de la détection de changements est forcément diminuée.
- ◇ Contraintes : elles demandent une bonne précision géométrique des cartes utilisées.

Aucune de ces méthodes n'est retenue en raison de leurs inconvénients évidents.

2.7.2.6 Méthodes d'interprétation visuelle

Elles aident d'analyser plusieurs images à la fois.

- ◇ Points forts : elles permettent d'incorporer la connaissance de l'analyste à l'interprétation.
- ◇ Points faibles : elles ne fournissent pas d'informations détaillées sur les changements. Cependant, elles dépendent du savoir-faire de l'analyste, exigent beaucoup de temps et ne permettent pas couramment une mise à jour.
- ◇ Contraintes : elles exigent un bon savoir-faire et une familiarisation avec la zone d'étude.

2.7.3 Quelques autres méthodes

Dans la littérature, on trouve diverses techniques de comparaison d'images. Entre autres, la méthode basée sur le calcul du simple index, celle proposée par Dekker [52] qui utilise le filtrage de Kuan sur une image issue du rapport des deux images multitemporelles. Celle de Stroobants [53] liée à la variabilité radiométrique dans les images de télédétection. La

technique de Rignot [7] conclut à l'utilisation de l'image rapport des deux images multitemporelles plutôt que l'image différence. Ou bien encore la méthode basée sur la mesure de disparité. Nous allons ici les détailler.

2.7.3.1 Technique basée sur la mesure de disparité

Une de ces techniques est celle de Hutchinson [54] qui utilise une distance développée à l'origine pour des problèmes de comparaison et d'approximation d'image fractale. Le problème de compararaison de deux images se ramène au calcul de la distance entre les deux mesures de probabilités modélisant les images. F.Barahona, C.A. Cabrelli et U.M. Molter [55] ont montré que le calcul de cette distance peut se formuler comme un problème de flots. Un algorithme efficace permettant de calculer cette distance en 1D a été proposé [56]. Deux ans plus tard, une approche étendant au cas 2D a été développée [57].

Soient I_1 et I_2 deux images en 1D avec n éléments, modélisées respectivement par deux mesures de probabilités μ et ν . La comparaison entre I_1 et I_2 se fait à travers la distance de Hutchinson, définie par la formule ci-dessous (2.7).

$$d_H(\mu, \nu) = \sup_h \left\{ \sum_i h_i (\mu_i - \nu_i) \right\} \quad (2.7)$$

$$sc \left\{ \begin{array}{l} |h_i - h_{i+1}| \leq 1; \quad i \in \{1, 2, \dots, n-1\} \\ h_1 = 0 \end{array} \right.$$

h lipschitzienne de classe C^1 .

Molter, Cabrelli, et Barahona [56] ont prouvé que ce type de problème est similaire à un programme linéaire et dont le dual correspond à un problème de flots et ce pour toute dimension.

2.7.3.2 Méthode du simple index

Le principe de cette technique repose sur le rapport entre deux scènes SAR de même géométrie. Le rapport aboutit a un signal assez bruité qui ne donne pas une bonne appréciation des changements détectés. Cependant, pour résoudre le problème, une variation sur l'arrangement du rapport a été proposée (2.8) :

$$D(i, j) = |1 - S_1(i, j)/S_2(i, j)| \quad (2.8)$$

- ◇ $S_1(i, j)$ et $S_2(i, j)$ indiquent respectivement les valeurs radiométriques des pixels à la position (i, j) de deux images SAR et
- ◇ et $D(i, j)$ est l'index de détection de changement à la position (i, j) .

L'expression $D(i, j)$ est assez claire pour assurer un résultat facilement compréhensible. Une hypothèse d'interprétation simplifiée sera avancée en ces termes :

- ◇ Si $S_1(i, j) = S_2(i, j)$ alors $S_1(i, j)/S_2(i, j) = 1$ et par conséquent $D = 0$ et cela signifie aucun changement.
- ◇ Plus les deux images diffèrent localement, plus le terme $1 - S_1(i, j)/S_2(i, j)$ différera de zéro(0) et plus les changements sont significatifs.

2.7.3.3 Méthode de Dekker

Cette technique met en relief la détection de changements dans l'imagerie SAR. Le bruit de speckle qui est un effet de la nature cohérente de SAR gêne la précision de détection de changements. Le filtrage de speckle est donc une démarche importante dans la détection de changement.

Le rapport d'intensité entre deux images SAR peut être exprimé sous la forme (2.9) :

$$r = xR \quad (2.9)$$

- ◇ r est le rapport d'intensité observé,
- ◇ x est la multiplicative du signal bruit dépendant et
- ◇ R est le rapport d'intensité sous-jacent.

Cependant, cet effet peut être réduit par le filtre LLMMSE (Local Linear Minimum Mean Square Error) de Kuan[58], est souvent choisi grâce à ses performances et sa simplicité.

Pour plus de détail, le lecteur intéressé est invité à consulter [59].

2.7.3.4 Méthode de Stroobants

Cette technique est proposée par Stroobants [60]. Elle permet de diminuer l'effet du speckle en remplaçant le pixel se trouvant dans l'image de référence à la position (x, y) par la moyenne pondérée des p pixels situés à la même position dans les p images.

Pour une image I_k parmi les p images, l'accès aux paramètres des moyenne μ_k et de variance σ_k locales du pixel $P_k(x, y)$ pris comme référence sont données par :

$$\mu_k = \frac{1}{p^2} \sum_{i=x-\frac{p}{2}}^{x+\frac{p}{2}} \sum_{j=y-\frac{p}{2}}^{y+\frac{p}{2}} P_k(i, j)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{p^2} \sum_{i=x-\frac{p}{2}}^{x+\frac{p}{2}} \sum_{j=y-\frac{p}{2}}^{y+\frac{p}{2}} (P_k(i, j) - \mu_k)^2$$

L'écart statistique qui sépare $P_k(x, y)$ des autres pixels est lié à la dispersion entre les paramètres μ_k et σ_k .

Soit un couple d'image (I_k, I_l) . L'écart de texture locale A_{kl} (texture moyenne non orientée), de moyenne radiométrique locale B_{kl} et le coefficient prenant en compte la stabilité temporelle des motifs structuraux C_{kl} sont donnés par les relations suivantes :

$$A_{kl}(x, y) = \left| \frac{\sigma_k}{\mu_k} - \frac{\sigma_l}{\mu_l} \right|$$

$$B_{kl}(x, y) = |\mu_k - \mu_l|$$

$$C_{kl}(x, y) = 1 - |c|$$

Où c est le coefficient de corrélation donné par (2.10) :

$$c = \frac{(P_k(x, y) - \mu_k)(P_l(x, y) - \mu_l)}{\sigma_k \cdot \sigma_l} \quad (2.10)$$

Ces coefficients apparaissent représentatifs des principaux modes de variations radiométriques au voisinage d'un pixel. Une fois ces coefficients combinés linéairement, on obtient un paramètre qui quantifie la proximité entre le pixel P_k et ses voisins. L'écart statistique entre le pixel $P_k(x, y)$ et un pixel frère $P_l(x, y)$ est le paramètre $D_{kl}(x, y)$ donné par (2.11) :

$$D_{kl}(x, y) = a \left| \frac{A_k l - \mu_A}{\sigma_A} \right| + b \left| \frac{B_k l - \mu_B}{\sigma_B} \right| + c \left| \frac{C_k l - \mu_C}{\sigma_C} \right| \quad (2.11)$$

À chaque pixel $P_k(x, y)$ est associé $p - 1$ paramètres $D_{kl}(x, y)$ correspondant aux distances les séparant des $p - 1$ pixels voisins. a , b et c sont des coefficients de pondération ajustables.

Le principe de décision, consiste en premier lieu à déterminer les seuils relativement au paramètre écart statistique. Le seuil de décision s'appuie alors sur les moments élémentaires μ_D et σ_D qui sont la moyenne et la variance de $D_{kl}(x, y)$.

$$\begin{cases} \text{SeuilMax} &= \mu_D + d * \sigma_D \\ \text{SeuilMin} &= \mu_D - e * \sigma_D \end{cases}$$

où $d, e \in \mathbb{R}^+$.

Le choix de traitement est alors comme suit :

- ◇ Si $D_{kl} \geq \text{SeuilMax}$, alors le pixel $P_k(x, y)$ pris comme référence est très différent des autres. Il y a changement, alors on affecte un niveau de gris de 255 (blanc en image 8 bits) à cette zone.
- ◇ Si $D_{kl} \leq \text{SeuilMin}$, alors le pixel $P_k(x, y)$ pris comme référence est très proche de son voisin(frère). Pas de changement, alors on affecte un niveau de gris de 0 (noir en image 8 bits) à cette zone.
- ◇ Si $\text{SeuilMin} \leq D_{kl} \leq \text{SeuilMax}$, alors le pixel $P_k(x, y)$ est remplacé par une valeur de niveau de gris de 128 (gris en image 8 bits) à cette zone.

En guise de conclusion, nous disons que cette technique de Stroobants, permet à travers ces différents coefficients de canaliser l'exploration d'une image via une recherche guidée. Elle s'appuie en partie sur les valeurs statistiques des moments et les seuils de décisions.

2.7.4 Méthode de Rignot

Cette technique se focalise sur la différence et le rapport des intensités radar multitemporelles. Ces deux valeurs [59] sont comparées via leurs statistique et probabilité d'erreur.

Dans le cas de différence, les changements dans la rétrodiffusion radar sont mesurés par la soustraction des valeurs d'intensité, pixel par pixel, entre deux dates.

Les intensités SAR multi-vues sont présumées à la distribution gamma :

$$p(I_0 / < I_0 >) = \frac{N^N I_0^{N-1}}{< I_0 >^N (N-1)!} \exp\left(-\frac{N I_0}{< I_0 >}\right)$$

Où $< I_0 >$ est l'intensité moyenne d'une région homogène à la date t_0 , et N est le nombre équivalent de vues de la données SAR. Une détection de changements est liée aux intensités radar $< I_0 >$ et $< I_1 >$ acquises respectivement aux deux dates t_0 et t_1 au-dessus de la même cellule de résolution. I_0 et I_1 sont supposées être mathématiquement indépendantes. La distribution conjointe de I_0 et I_1 est donc le produit de ses distributions marginales.

La distribution de la différence ($d = I_1 - I_0$) des intensités du signal est dérivée après un changement de variables par intégration de la distribution conjointe sur I_0 .

$$p(d / < I_0 >, < I_1 >) = \frac{N^N}{(N-1)!} \frac{\exp(-N \frac{d}{< I_1 >})}{(< I_0 > + < I_1 >)^N} * A$$

Où A est donnée par l'équation (2.12) :

$$A = \sum_{j=0}^{j=N-1} \frac{(N-1+j)!}{j!(N-1+j)!} d^{N-1-j} \left[\frac{< I_0 > < I_1 >}{N(< I_0 > + < I_1 >)} \right]^j \quad (2.12)$$

Ainsi, la moyenne de la différence d et au carré notée $E(d)$ (respectivement $E(d^2)$) est donnée par l'équation (2.13) (respectivement (2.14)) ci-dessous :

$$E(d) = \frac{< I_0 >}{N} \sum_{j=0}^{j=N-1} \frac{(N-j)(N-1+j)!}{j!(N-1)!} * C \quad (2.13)$$

$$E(d^2) = \frac{< I_0 > < I_1 >}{N^2} \sum_{j=0}^{j=N-1} \frac{(N-j+1)(N-j)(N-1+j)!}{j!(N-1)!} * C \quad (2.14)$$

Où C est donnée par la relation :

$$C = \frac{(< I_1 > / < I_0 >)^{N+1}}{(1 + < I_1 > / < I_0 >)^{N+j}}$$

La distribution de la différence dépend du changement relatif ($< I_0 > / < I_1 >$), et d'un niveau d'intensité référence, c'est-à-dire, soit $< I_0 >$ soit $< I_1 >$.

Une conséquence évidente, c'est que les changements ne vont pas être détectés de la même manière dans les régions de hautes intensités que dans les régions de basse intensité, ce qui n'est pas souhaitable.

Dans le cas du rapport, les changements sont mesurés par la division des valeurs d'intensité, pixel par pixel, et sont exprimés convenablement en **décibels**.

Ainsi, de façon analogue, la distribution du rapport $r = I_1 / I_0$ est dérivée après un changement de variables par intégration de la distribution conjointe sur I_0 .

$$p(r / < I_0 >, < I_1 >) = \frac{(2N-1)! \bar{r} r^{N-1}}{(N-1)!^2 (\bar{r} + r)^{2N}}$$

Où \bar{r} est donnée par :

$$\bar{r} = \langle I_1 \rangle / \langle I_0 \rangle$$

La moyenne $E(r)$ et l'écart type $\sigma(r)$ du rapport sont donnés par les relations suivantes :

$$E(r) = \frac{N}{N-1} \bar{r}$$

$$\sigma(r) = \frac{N(2N-1)}{(N-1)^2(N-2)} \bar{r}$$

Eu égard à tout ce qui a été dit, relatives aux méthodes de comparaisons d'image, il existe, cependant, bien d'autres méthodes dans la littérature : distance de Hausdorff, analyse longitudinale, dissimilarité, et bien d'autres encore.

Par ailleurs, la quasi majorité des méthodes de détection rencontrées dans l'abondante littérature n'apportent malheureusement pas grand chose. Cela s'explique par le bruit inhérent aux images radar ou encore l'utilisation de certaines techniques nécessitent plusieurs images [7] alors nous avons que deux images à notre disposition.

Nous avons donc choisi de continuer notre étude en nous concentrant dans un premier temps sur quelques méthodes de comparaison d'images bien connues dans le monde de traitement d'images avant de nous lancer sur nos propres approches.

2.8 Conclusion

La détection de changements par image satellite, est un thème assez vaste. Il fait appel à plusieurs disciplines. La physique pour comprendre la genèse des capteurs, de radars et des satellites. Le traitement de signal pour mieux appréhender par exemple les phénomènes ondulatoires dans leurs globalités (émissions/receptions). Les mathématiques pour formaliser et modéliser le problème. Et enfin, l'informatique, pour mettre en oeuvre ce qui a été formalisé afin de valider le modèle théorique par expérimentation.

Toutes ces différentes méthodes, relatives à la détection de changement à partir d'images SAR, rencontrées dans la littérature ont leurs avantages et inconvénients. Elles demeurent majoritairement à un stade expérimental focalisées à des domaines très spécifiques. Aucune méthode n'a traité la détection de changement dunaire à partir d'images satellitaires, de façon assez formelle. En outre, la plupart des méthodes rencontrées sont fondées sur des algorithmes directionnels.

Cependant, ces différentes méthodes servent comme un cadre de réflexion permettant ainsi de forger d'autres nouvelles techniques en traitement d'images. En particulier, dans le domaine de détection de changement dunaire à partir d'images SAR.

Contrairement aux méthodes existantes, les nouvelles techniques que nous avons élaborées, durant cette thèse, cf. chapitre 5, ont dans leurs quasi-majorités les avantages majeurs suivants :

À elles s'affranchissent de speckle,

elles privilégient des directions adéquates optimisant les valeurs radiométriques et

elles simulent la trace de l'angle d'incidence du radar générateur de la valeur optimale.

Tableaux

2.1	Plates-formes satellitales et leurs principales caractéristiques	20
2.2	Quelques satellites à vocation particulière	21
2.3	Comparaison entre RADARSAT et ENVISAT	24
2.4	Classification des méthodes de changements	43

Figures

2.1	Acquisition de l'information par télédétection	13
2.2	Structure d'une onde électromagnétique	13
2.3	Spectre électromagnétique & Bandes d'hyperfréquences les plus utilisées	14
2.4	Plates-formes d'acquisition des données de la télédétection	16
2.5	Trajectoire et couloir-couvert d'un satellite	16
2.6	Résolution spatiale et taille pixel	18
2.7	Déformation géométrique % conditions d'acquisition RADAR	24
2.8	Dunes de sable dans le désert	26
2.9	La saltation	28
2.10	Influence de la gravité sur des saltons & reptons	29
2.11	Une barkhane dans le désert	30
2.12	Vent soufflant sur une dune	31
2.13	Longueur d'écrantage & une mega-dune [24]	33
2.14	Image optique & une représentation du profil	34
2.15	Aéroport Charles de Gaulle & image Envisat d'une zone de désert	37

Chapitre 3

Analyse des images SAR du désert

Ce chapitre est consacré à une analyse des éléments intéressants des images SAR du désert du Tibesti au nord de Faya-Largeau. Cette région frontalière avec le Niger présente l'avantage de comporter plusieurs types de paysages et donc de nous permettre d'étudier les possibilités de détection de changement sur ce type de zone. Ce chapitre est structuré en quatre parties, une première présentant la zone et l'aspect général des images SAR, une deuxième détaillant l'aspect des éléments visibles de paysage du point de vue de l'influence de la nature des sols sur la formation des images, une troisième de comparaisons statistiques des distributions de pixels issues des zones à discriminer et une dernière sur les possibilités de détection.

Sommaire

3.1 Paysage et Image	51
3.2 Analyse de l'aspect image des types de zones intéressantes . .	58
3.3 Statistique des images et possibilité de caractérisation	65
3.4 Possibilités de détection	70
3.5 Conclusion	71

3.1 Paysage et Image

Ce travail concerne la détection de changement dans le désert sur la zone du Tibesti. Ce mot désert correspond ici au sens imaginaire, c'est à dire une étendue de sables ou de roches. Il nous faut choisir un site d'étude dans une réalité beaucoup plus complexe que nous allons effleurer ici.

Ainsi que nous l'avons exposé dans la description de notre zone d'étude, le Tibesti est un massif montagneux de formation ancienne, théâtre de plusieurs épisodes volcaniques dont certains très récents. La zone que l'on appelle désert du Tibesti est la partie du Sahara qui borde le sud de ce massif et s'étend jusqu'à la limite du Sahel. Les plateaux du massif disparaissent dans l'immense dépression Tchadienne où n'existe que quelque point faiblement fertile.

La variation d'altitude est particulièrement intense entre le massif dont le sommet culmine à plus de 3000 mètres et le désert environnant dont l'altitude est globalement inférieure à 200 mètres. La figure FIG. 3.1 présente une carte de la zone, centre du site étudié et la figure FIG. 3.2 présente une image satellite optique de ce même paysage.

Ce qui frappe immédiatement quand nous regardons cette carte est le peu d'éléments qu'elle comporte. Ceci est conforme à l'occupation humaine permanente de cette zone qui est extrêmement faible et de la faiblesse des infrastructures qui en découle. Mais il s'agit d'une vision bien pauvre et surtout conforme à l'idée que se fait l'homme moderne et urbanisé des déserts et du Sahara en particulier.



FIG. 3.1: Carte du désert du Tibesti extrait de Google map, centre du site

L'image de la figure FIG. 3.2 apporte déjà beaucoup plus d'information et met en évidence la variété des paysages même si ceux-ci sont essentiellement des minéraux. Cela dit, cette impression d'uniformité doit être tempérée par le simple fait que l'image présentée couvre une zone d'environ cinq cent par cinq cent kilomètres. Le premier enseignement que nous devons tirer de cette comparaison et si la diversité des paysages existe, elle est peu cartographiée du fait qu'il s'agit d'une des zones les plus difficiles d'accès au monde.

Il est possible de distinguer assez vite deux types de terrain matérialisé par des sols différents. Les zones de roches visibles au centre de l'image de la figure 3.2 contraste très fortement avec les zones de sables majoritaire qui bordent les massifs sur ses images optiques. Le détail de l'occupation des sols est par contre plus complexe car si les éruptions volcaniques ont crée des zones de roche très vaste, où rien ne pousse, et si il existe des zones de sables quasiment uniformes, il existe également de nombreuses zones de mélange ou de transition qui vont compliquer l'interprétation des images qu'elles soient visuelles ou automatiques.

L'occupation humaine de ces zones est très faible mais n'est malgré tout pas tout à fait nulle. Il s'agit du lieu de vie des Toubous peuplade particulièrement adapté à la vie dans le désert. Dans les vallées du Tibesti persiste quelques végétations le long de cours d'eau non permanent ou la vie est possible quoi que particulièrement difficile. Dans ces zones il y a des arbres et quelques cultures tels que nous pouvons le voir dans la vallée de Zouar (FIG 3.3).

Cette présence humaine n'introduit que très peu d'effet de par l'agriculture. Il n'y aura donc pas d'effet lié de structure ou de texture liée au parcellaire mais il faudra par contre tenir compte d'éventuelle voie de communication permettant de rejoindre la ville de Faya-Largeau au sud ou de Bardai au nord. Nous constatons sur ces mêmes zones que la couverture végétale est extrêmement faible et que les pâturages de ces zones ne peuvent qu'être intermittents.



FIG. 3.2: Image du désert du Tibesti extrait de Google map



FIG. 3.3: Image du désert du Tibesti extrait de Google map montrant la partie la plus dense de la ville de Zouar

Conscient de tous cela, notre choix de zone s'est porté sur le début de l'erg de Bilma c'est à dire le sud ouest des monts Tibesti, le long de la frontière Nigérienne. Cette zone nous permet d'avoir deux types de zones s'alternant avec un minimum de perturbations du à l'homme ou au rare pluie :

- des zones de roches affleurantes dans le sable associé au sud du massif du Tibesti
- des zones de sable comportant des dunes de profils variés.

Notre choix de zone a ensuite été contraint par la disponibilité des scènes satellites des capteurs SAR. Notre choix s'est porté sur l'instrument ASAR ENVISAT en polarisation V/V dont sa résolution spatiale est de 30 m et la taille d'un pixel au sol fait 12.5 m x 12.5 m.

Ce choix a été guidé par :

- l'idée d'avoir les données les plus génériques possibles de façon à pouvoir sur le long terme prolonger nos travaux avec d'autres capteurs. La polarisation V/V, la longueur d'onde (bande C) et la gamme d'incidence étant parties les plus courantes nous maximisons nos chances de transposer nos résultats sur d'autres capteurs.
- l'impossibilité de dégager des travaux passés que nous avons analysés un jeu de paramètres d'acquisitions a priori plus intéressant que celui proposé par ce capteur.

Nous nous sommes ensuite heurtés à la faible disponibilité des données sur la zone qui nous intéresse. En effet sur la période de 2004 à 2010 seules six (06) images ont été acquises sur cette zone, ce qui laisse un faible choix. Ce choix se réduit d'autant plus nous souhaitons des images acquises à la même période de l'année est si possible en Novembre pour minimiser les risques de perturbation dues à une pluie. De la même façon nous n'avons pas eu le choix de la direction de visée car seule des passe descendant étaient disponibles sur cette zone.

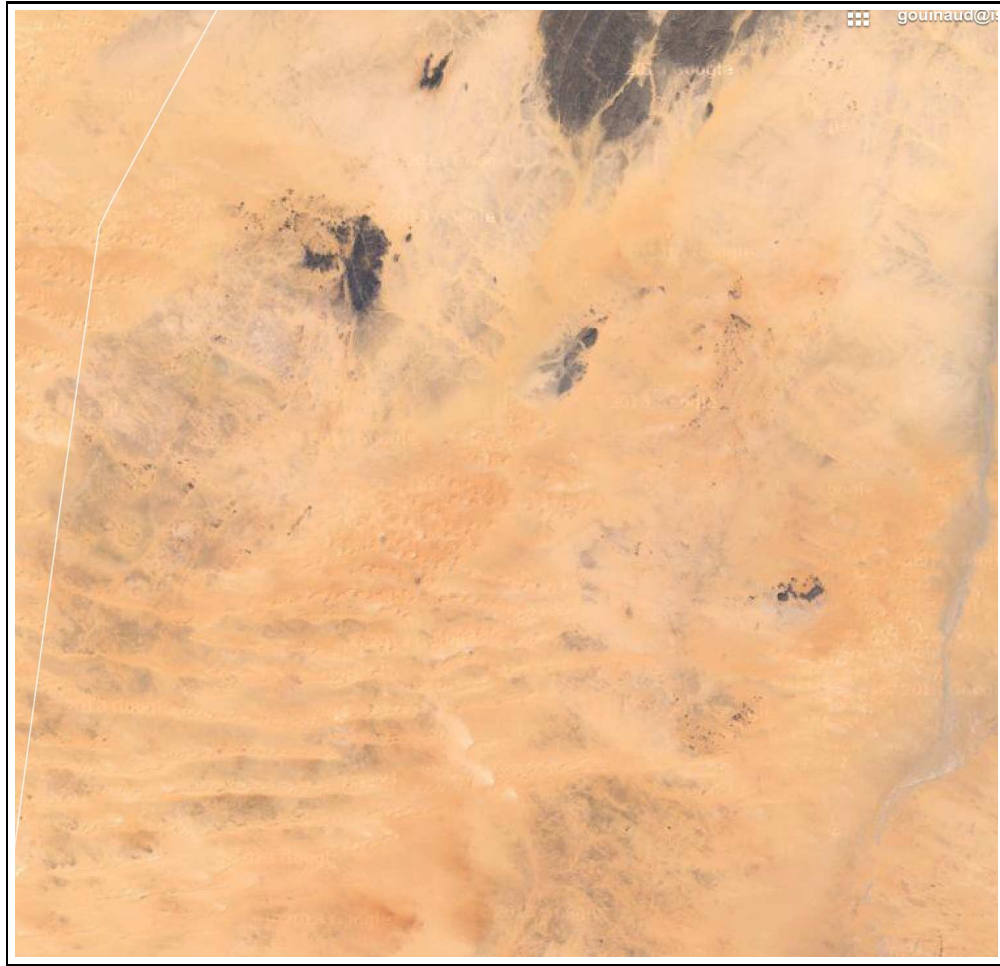


FIG. 3.4: Image optique, au sud du massif du Tibesti, extrait de Google map

Nous verrons plus avant que cela n'a pas entravé la qualité de notre étude.

Notre choix final s'est porté sur deux images séparées de deux années acquises le 27 octobre 2004 (I_1), représentée sur la figure FIG. 3.5(a) et le 1 novembre 2006 (I_2) représentée sur la figure FIG. 3.5(b). Les dimensions de ces images sont de (8392,8888) pour I_1 "respectivement (8396,8885) pour I_2 ". En d'autres termes, l'image I_1 fait 104.9 km x 111,1 km sur l'échelle terrestre "respectivement 104.95 km x 111.062 km pour l'image I_2 ". Sur ces images nous constatons que nous disposons en fait d'au moins cinq types de paysages distinguables :

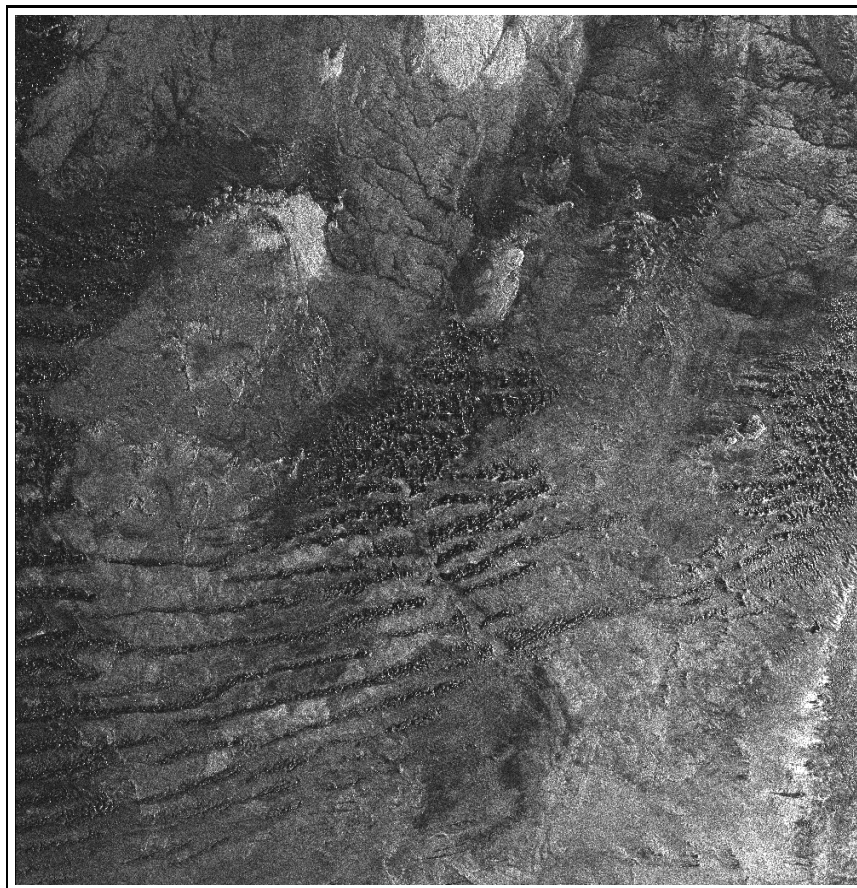
- Au nord un morceau du massif du Tibesti et deux zones de roche un peu élevées, nous permettant de disposer de zones dont nous sommes sûrs qu'il n'y aura pas de déplacement ce qui nous permettra de mesurer les déplacements dans les zones de sable de façon fiable.
- Au sud des grandes zones de roches affleurantes plus ou moins recouvertes de sable correspondant à des sols anciens.
- De vastes champs de dunes de type variés séparés par des zones de roches affleurantes.
- Des zones de sables où apparaissent de gros rochers en faible nombre.

- Quelques rivières fossiles ou non permanentes comportant quelques arbustes.
- Une zone où le sable est très chargé en sel étant vraisemblablement un ancien fleuve.

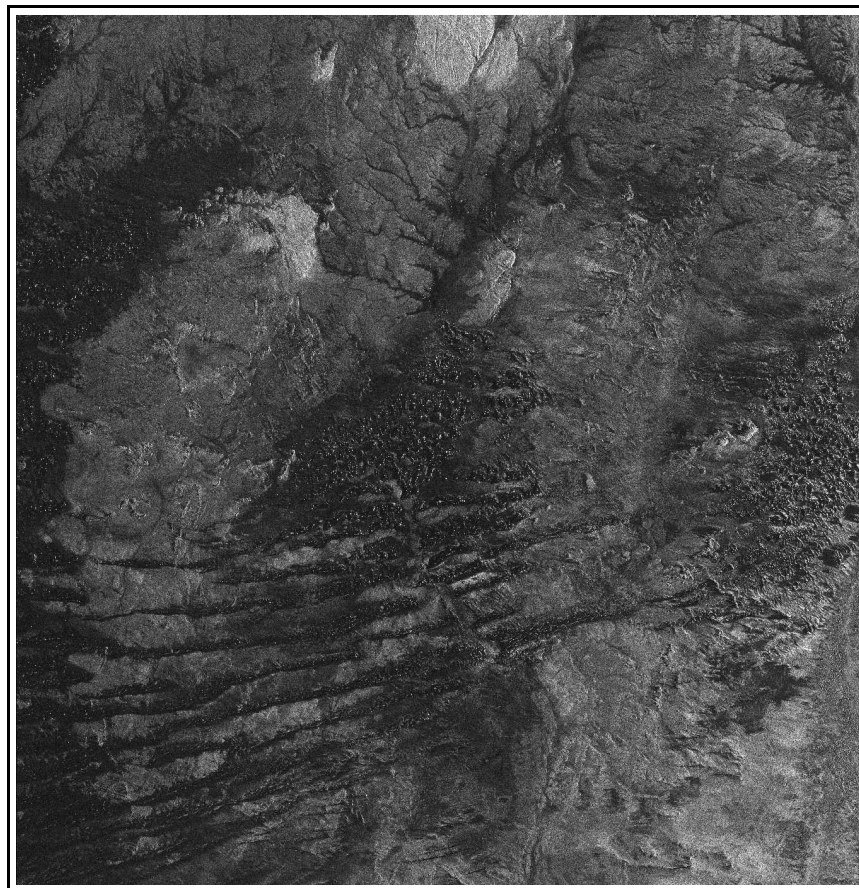
Cet ensemble constitue un échantillonnage varié de situation nous permettant de tester plusieurs scénarios et méthodes de suivi de changement notamment sur la discrimination et le déplacement des dunes.

L'observation des images des figures FIG. 3.5(a) et FIG. 3.5(b) associée à celle de figure FIG. 3.4 montre un contraste beaucoup plus important des images SAR. Ceci s'explique dans un premier temps par le fait, que Les images SAR ont donc une grande sensibilité au changement d'état de surface, contrairement aux images optiques plus sensible à la nature du sol par nature moins changeante dans des zones désertiques. Cela dit, les effets dans les zones de sable peuvent être paradoxaux car il y aura un effet prépondérant de la forme du terrain avec des échelles différentes et une sensibilité à l'orientation qui va compliquer toute interprétation.

La partie suivante de ce document reprend en détail la formation des images radar sur ce type de zones de façon à expliquer les effets visibles dans les images et à poser le premier jalon de méthodes permettant une interprétation automatique de ce type de scène.



(a) Image ASAR ENVISAT 2004, I_1



(b) Image ASAR ENVISAT 2006, I_2

FIG. 3.5: Images ASAR ENVISAT de notre zone d'étude au sud du massif du Tibesti

3.2 Analyse de l'aspect image des types de zones intéressantes

Afin de se faire une idée de la sensibilité du capteur sur les zones de sables nous présentons sur la figure 3.6, la traversée par une piste d'une zone de sable légèrement élevée.



FIG. 3.6: Piste sur Image optique traverser de sable (source google)

La même zone vue sur des images ENVISAT ASAR le la zone en 2004 et 2006 (FIG. 3.7 et FIG. 3.8) montre ces mêmes traces.



FIG. 3.7: Piste sur Image ASAR 2004 envisat traverser de sable

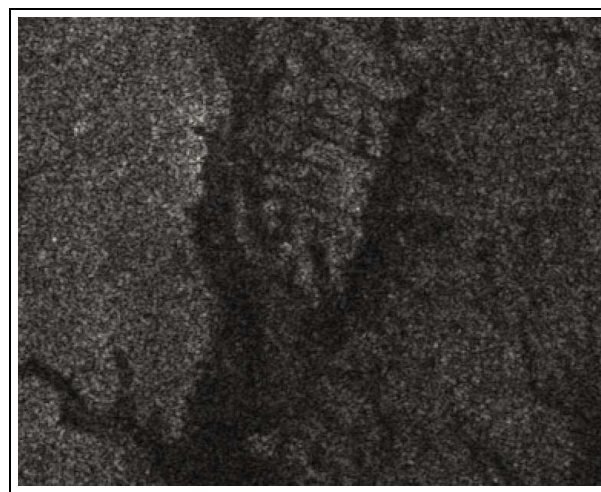


FIG. 3.8: Piste sur Image ASAR 2006 envisat traverser de sable

Nous remarquons que l'effet sur les images est exactement inverse. Les traces apparaissent en sombre sur les images SAR alors qu'elles apparaissent en clair sur les images optiques.

Dans les deux cas cela correspond à une diminution de la rugosité de la surface qui dans le cas du radar assombri les images alors que le creusement du sable le rend plus clair dans le cas des images optiques. Par contre, il est notable que les effets sur les images radar sont très visibles malgré la faible résolution alors que l'image optique possède une résolution 8 fois meilleurs sans engendrer des contrastes comparables.

L'observation des images optiques de la zone nous montre qu'à de très rares expressions près des zones de sable pure comporte des dunes. En fait, un très petit nombre de zone, visiblement protégé du vent, comporte des zones de sable de faible pente. Il y a donc deux types de zones où il est intéressant d'étudier la formation du signal radar afin de nous guider dans notre recherche d'algorithme de caractérisation : les zones de roches, qui sont en fait des zones de mélange de roches, de sable et les champs de dune. Cela peut paraître superflu car l'objet de notre étude est principalement le suivi des dunes mais la discrimination préalable des zones de dunes du reste du paysage sera nécessaire pour permettre ensuite leur caractérisation.

3.2.1 Zone de roche

Les zones de roches apparaissent sur les images dans un gris moyen comportant un bruit de speckle très exprimé. Elles ne comportent que très peu de point brillant dont nous pouvons penser qu'ils sont dus essentiellement aux fluctuations statistiques. Certains de rochers de forme particulière pourront éventuellement créer des rétrodiffusions exceptionnelles.

Suivant un principe majoritaire, les zones de roches présentes dans notre site d'étude peuvent être de deux natures géologiques :

- Des zones de roche volcanique issues des éruptions récentes et peuvent éroder.
- L'affleurement du socle cristalin ancien.

Si le premier type est relativement exempte de sable le mélange dans le cas des affleurements est forcément celle d'une couverture en sable faible à importante. Du point de vue de la rétrodiffusion radar est relativement classique et dépend d'abord de la rugosité de la surface l'orientation intervenant en deuxième dès lors que la surface est en vue du radar.

Une surface est dite rugueuse si l'écart quadratique moyen de ses hauteurs satisfait au critère de Rayleigh :

$$\Delta h \gg \frac{\lambda}{8 \cos(i)}$$

où Δh est l'écart quadratique moyen des hauteurs, λ la longueur d'onde et i l'incidence du radar. Nous constatons donc que les paramètres du capteur auront une grande influence sur la classification des objets. Une justification de ce critère est donnée par A. Lopes. *Ceci revient à considérer les différents déphasages $\Delta\Phi$ entre les points de la surface et à comparer leur valeur quadratique moyenne à un déphasage limite de $\frac{\pi}{8}$* [61].

Ce type de sol est en très grande majorité constitué de minéraux, par conséquent son comportement au cours du temps sera relativement constant. Une caractéristique intéressante de ces objets du point de vue de la rétrodiffusion radar est qu'ils sont pratiquement Lambertiens et donc rétrodiffusent dans toutes les directions. Cela veut dire que les zones rugueuses auront une signature radar peu variable suivant les directions.

Nous constatons que le seuil de rugosité donné par le critère de Rayleigh est dépendant de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence du capteur. Par conséquent le classement des objets sera dépendant du capteur utilisé.

Le seuil de rugosité pour ENVISAT est :

$$S_r = \frac{5.6}{8 \cos 23} = 0.76 \text{ cm}$$

D'un point de vue statistique sur l'image des surfaces rugueuses seront proches des statistiques du speckle, et donc la loi de rétrodiffusion sera un avatar de la loi de Rayleigh avec des variations dépendantes essentiellement du nombre de look, c'est-à-dire une loi χ pour les zones homogènes ou une loi K pour les zones hétérogènes.

Certains rochers de gros volume et de forme spécifique pourront avoir une rétrodiffusion spéculaire pouvant créer des zones très brillantes mais avec une très faible probabilité sauf s'ils sont de forme quasi circulaire. Nous remarquons par contre que certains pixels brillants sont stables et permettent la prise d'images dont nous sommes sûrs qu'ils seront fixe dans le temps.

Sur la zone du Massif du Tibesti, les zones de roches sont fracturées par des vallées dues à des rivières fossiles où se concentre le peu de terre utilisable pour l'agriculture. Notre choix de zone d'étude au sud du Tibesti vise par conséquent à minimiser ce type de zone en choisissant une prise de vue adaptée.

3.2.2 Dunes

Ainsi que cela est exposé précédemment une dune de sable possède deux faces de forme différente. La face au vent est forcément convexe et la face sous le vent est de forme concave du fait des avalanches de sable se produisant à partir du sommet et de la saltation se produisant en haut de la dune qui arrache du sable au profit d'autres dunes. Du point de vue de l'imagerie radar l'aspect image d'une dune dépendra donc de la direction de visée du capteur.

Les deux cas possibles sont illustrés en deux dimensions sur la figure FIG. 3.9. La dune vu d'un côté, ou de l'autre, apparaîtra donc dans l'image radar comme une succession de zone claire, puis brillante et enfin sombre. Les premières correspondent à la pente moyenne ou forte, les deuxièmes à la partie de la dune dont la normale est exactement dans la direction de visée du radar, et les troisièmes aux zones cachées qui sont par conséquent à l'ombre.

Il convient de détailler un peu l'aspect de ces trois zones :

- Les franges claires peuvent éventuellement être des layovers et de prolonger de dune en dune. En effet dans les zones, telles que montrées sur la figure FIG. 3.10(a), sont constituées par un empilement de dunes qui sont majoritairement des Barchans. Celles-ci arrivent à produire des cordons qui se voient comme tels.
- Les zones sombres que l'on voit sur FIG. 3.10(b) correspondent aux ombres créées par les dunes elles mêmes. Comme il s'agit d'image radar SAR où l'émission et la réception sont faites avec la même antenne les zones d'ombre sont les zones non éclairées et elles peuvent se porter sur d'autres dunes mais toujours dans la direction des lignes de

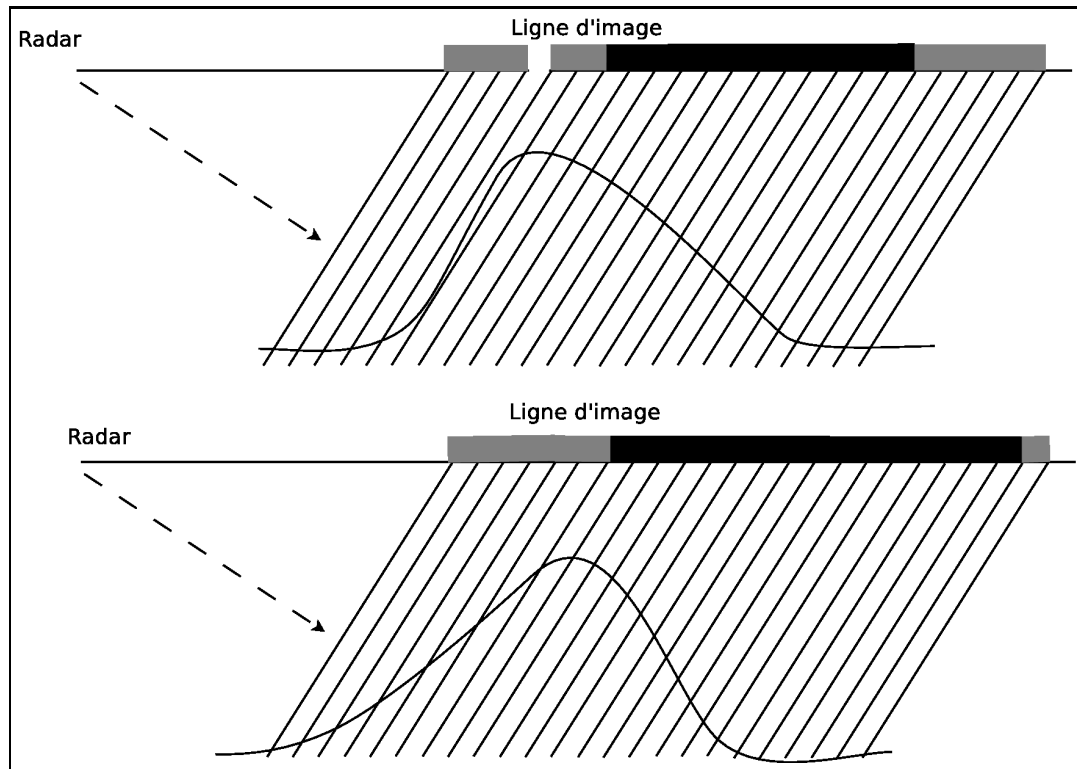


FIG. 3.9: Modèle de rétrodiffusion de dunes en imagerie SAR satellitaire.

l'image.

- Les parties de la dune exactement tournées vers le radar vont créer des pixels de grandes brillances sur l'image que nous appellerons points brillants dans la suite. Leur forme en croix très caractéristiques provient de leur caractère spéculaire..

La figure FIG. 3.10 présente un champ de dunes vue sur une image optique (a) et un champ de dunes en imagerie SAR satellitaire ENVISAT. Vue à droite car il s'agit d'une passe descendant (b).

L'examen des images révèle cet aspect le plus étonnant des images de désert tant ses points brillants sont en grand nombre associés au coté sombre des ombres. Le novice qui observe ces images pour la première fois pense avoir à faire soit à des constructions, soit à des amas de rocher tel qu'il en existe dans cette région. En réalité il n'en est rien, et ces points brillants s'expliquent tout à fait par la forme oblique des dunes qui fait qu'il existe toujours une partie de celle-ci dont la normale pointe parfaitement dans la direction azimutale du radar.

Nous allons donc dans un premier temps nous intéresser aux ombres puis à la caractérisation de ces points brillants.

L'omniprésence de zone sombre dans les images SAR des champs de dunes tel que l'on peut les voir sur FIG. 3.10(b) (zoom sur l'image I_1 de 2004, de dimension (2048, 2048) pixels) s'explique assez facilement par :

- Les faces des dunes tournées vers le radar sont raccourcies par l'effet de raccourcissement des pentes tournées vers le capteur inhérent aux images radar. Les zones claires

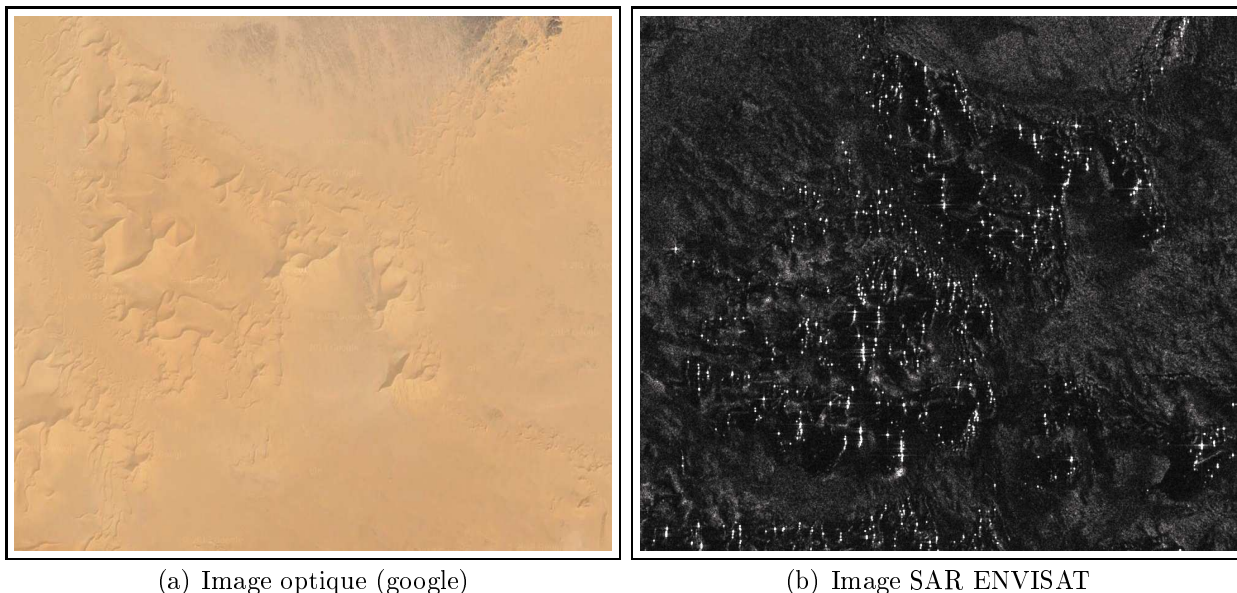


FIG. 3.10: Champ de dunes en image optique et SAR

sont donc *minces* et dans une proportion inférieure à la surface réelle.

- La forme des dunes fait qu’il existe peu de zones de normale constante. Le signal est donc soit très fort, donnant lieu à des points brillants, soit défavorables donnant lieu à des parties sombres.
- Avec des angles de radar tels que ceux d’ENVISAT il y a des ombres générées par les dunes elles mêmes. Leur proportion est par contre difficile à évaluer vu le peu d’information précise sur la pente des dunes. Nous étudierons donc les zones de dunes d’un point de vu statistique afin d’évaluer la constitution exacte des zones sombres.

Il est d’emblée intéressant de mesurer la variabilité de ces points brillants entre des images issues de deux dates d’acquisition. Dans ce but nous avons sélectionné une sous zone de celle présentée sur l’image de la FIG. 3.10(b) et nous sommes livrés à un décompte manuel des points brillants en procédant de la façon suivante :

- Nous cherchons les points visibles et identifiables dans les deux images et nous les marquons.
- Nous recensons les pixels brillants dans un cadrillage carré.
- Nous marquons des couples de point facilement identifiables dans les deux images.
- Nous calculons ensuite la distance entre tout les points marqués en prenant un comme référence.
- Nous calculons ensuite la direction du déplacement.

Nos images ayant été capturées via le même capteur embarqué sur satellite utilisant la même orbite, les conditions de prise de vue sont quasi similaires, les variations d’angle sont donc faible et la rotation entre les deux images également. Nous pouvons donc évaluer grâce aux mesures ci-dessus que les effets combinés de petite variation de condition d’acquisition et ceux dus à la variation de la forme du terrain entre deux acquisitions. Ces dernières peuvent être assimilées à un changement de forme des dunes.

Un exemple des résultats du recensement des pixels brillants sur les images (I_1 et I_2 de même dimension (2048, 2048) pixels) des FIG. 3.11(a) et FIG. 3.11(b) sont repris dans le tableau TAB. 3.1. Les secteurs C1 et D1 sont des secteurs où il n'y a pas de dunes et nous constatons qu'il n'ont pas des points brillants. La stabilité du nombre des points est remarquable dans les autres zones qui sont celles qui contiennent effectivement des dunes. Une observation attentive de ces images permet aussi de remarquer que prise individuellement les dunes conservent un aspect constant autour des points brillants sur les deux dates. Nous en tirons donc une première conclusion sur l'intérêt que représentent les pixels brillants pour la caractérisation des champs de dunes et éventuellement de celle-ci.

Sur ces mêmes images nous marquons 30 couples de points facilement identifiables visibles également sur les figures FIG. 3.11(a) et FIG. 3.11(b) et des points de référence situés au nord de ceux-ci dans la zone de roche.

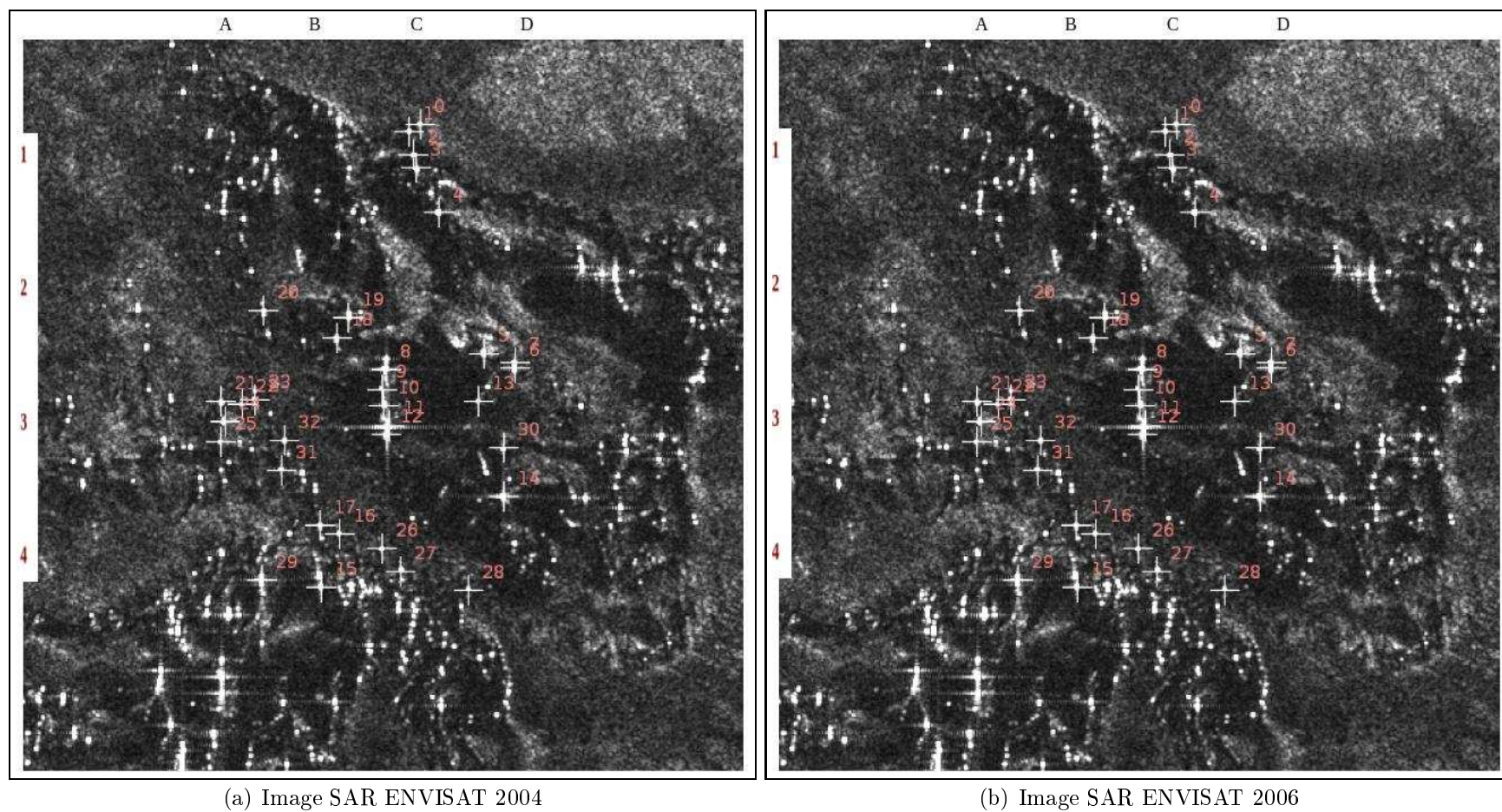


FIG. 3.11: Point brillant d'un Champ de dunes en imagerie SAR ENVISAT

	2004 A	2006 A	2004 B	2006 B	2004 C	2006 C	2004 D	2006 D
1	5	5	6	5	0	0	0	0
2	5	6	7	7	2	1	5	4
3	9	8	8	6	5	3	6	7
4	9	9	14	13	10	9	3	2

TAB. 3.1: Nombre de pixels brillants sur un quadriage régulier des images FIG.3.11 (a) et (b)

Nous avons ensuite calculé ce déplacement en utilisant les deux points de références situés dans la zone de roche. D'un point de vu numérique nous constatons un déplacement moyen de l'ordre de deux pixels situés majoritairement dans la direction sud ouest. Nous présentons sur la figure FIG. 3.12 les vecteurs de ces déplacements. Ce résultat est conforme à ce que nous pouvions attendre dans cette zone. En effet, le vent soufflant majoritairement du nord est dans cette zone il est logique que les dunes se déplacent au sud ouest.

Cette évaluation doit être prise avec précaution mais montre que les pixels brillants et les zones sombres sont des caractéristiques fortes sur lesquelles une détection peut s'appuyer. La partie suivante vise à chiffrer globalement ces différences et à ébaucher les possibilités de détection.

3.3 Statistique des images et possibilité de caractérisation

Afin de mieux connaître les caractéristiques exploitables des images de notre zone nous avons réalisé une photo interprétation partielle de façon à produire des images de masque. Celle-ci nous permette de caractériser la distribution statistique des pixels des différents types de sol présent dans notre zone d'étude. Nous nous sommes intéressés à trois des ces types représentant la majorité de la zone :

- Les zones de dunes,
- les zones de roches anciennes où règne un mélange de sable,
- les zones de roches du massif du Tibesti issues de l'activité volcanique.

Pour chacun de ces types nous avons calculé, des histogrammes et un tableau des statistiques du premier ordre les plus courantes. Le choix de celle-ci a été guidé par le fait que nous voulions des valeurs soient fiables en contexte non Gaussien avec des tailles d'échantillon faible afin de permettre une détection via de petit échantillon par la suite. Les résultats de ces calculs sont présentés sur les figure FIG. 3.13 et FIG. 3.14 pour les histogrammes. Les valeurs des mesures sont quand à elles dans les tableaux TAB. 3.2 et TAB. 3.3.

L'analyse des histogrammes des figures FIG. 3.13 et FIG. 3.14 nous permet de tirer quelques conclusions quand à la distribution statistique des pixels dont :

- La distribution statistique des zones de dunes est très étalée et dissymétrique et elle a une forme qui corespond à un avatar de la loi de Rayleigh.

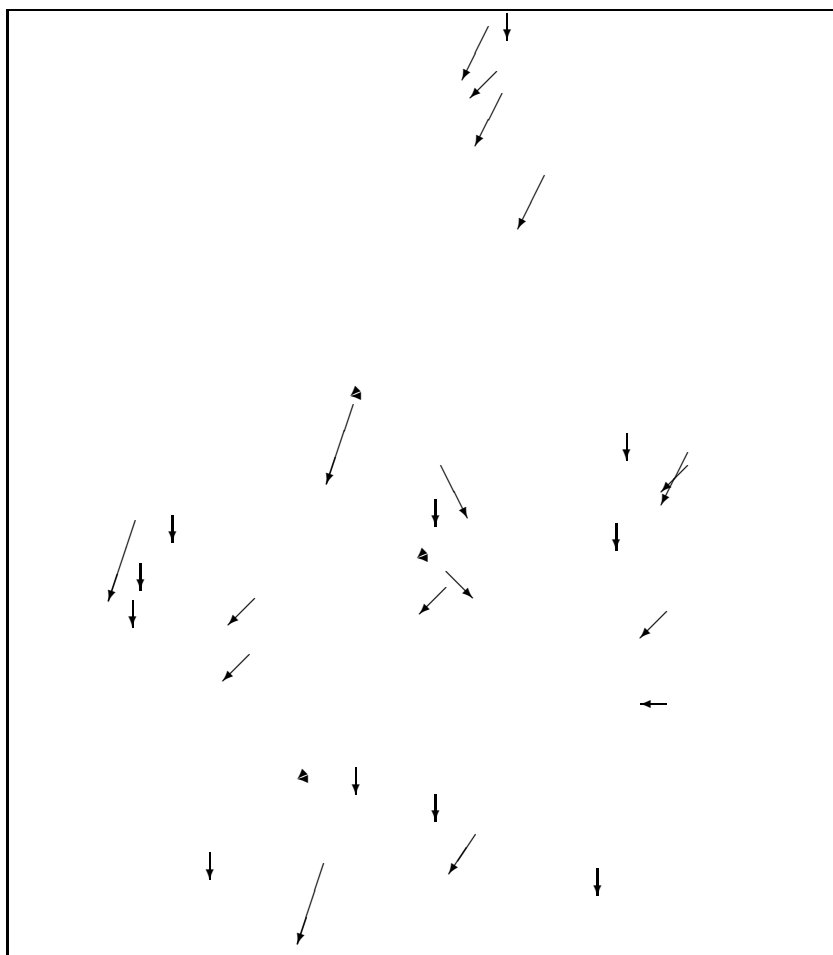


FIG. 3.12: Déplacement de points brillant dans une zone de dunes entre deux images Envisat en l'année 2004 et 2006 (exagéré 10 fois)

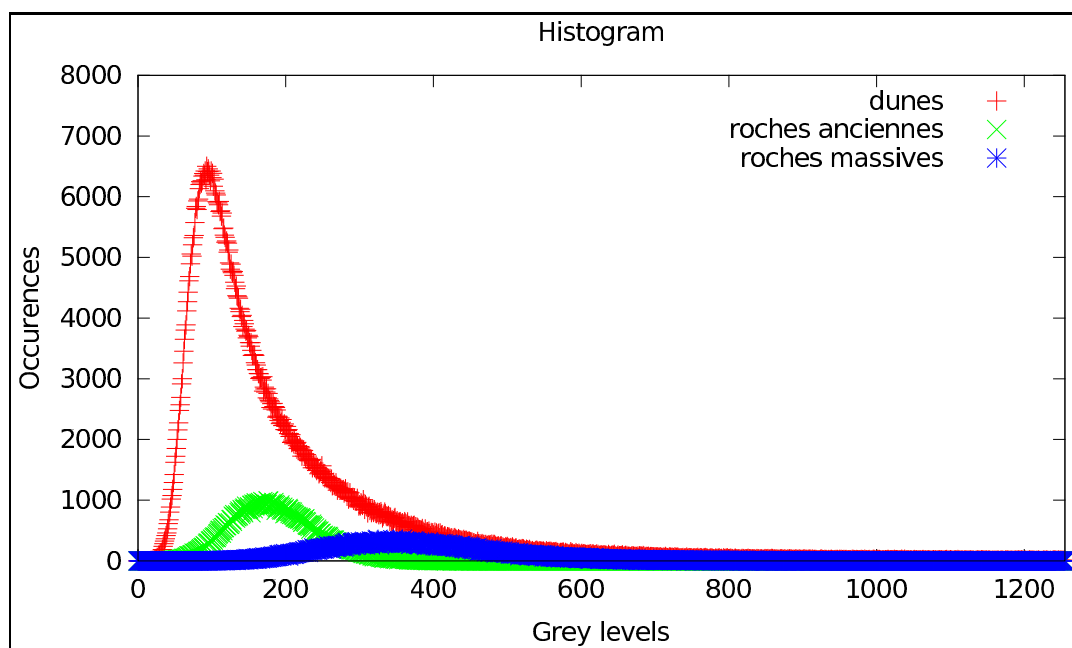


FIG. 3.13: Histogramme de zone de différente sorte sur les images de 2004

- Les deux types de zones de roches ont des distributions comparables correspondant elles aussi à la forme de loi typique de texture imagé avec des ondes cohérentes correspondant à un fort bruit de speckle. Elles sont par contre très décalées en intensité ce qui se voit par leur maximum décalé.
- Les zones sombres des zone de dunes se retrouvent dans le début de l'histogramme sans que se dégage deux modes séparables.
- La comparaison des images dans les deux zones montre que les formes de distribution sont très stables dans le temps ce qui n'a rien d'étonnant vu la forte minéralité du sursol.

Ces faits nous conduisent à penser que l'aspect majoritairement des zones de dunes est majoritairement du à de faible valeur de rétrodiffusion provoquée par des faces mal orientées. Il ne s'agirait donc pas de zones d'ombres malgré ce que leur aspect laisserait croire. Nous allons voir dans la suite que cette hypohèse est corroborée par l'analyse des mesures statistiques.

classe	min	max	pop	moy	media	ecart ty	coef var	ske
Image	0	65280	73427698	207.85	180.00	433.55	2.086	102.668
Dunes	12	13921	931533	199.13	141.00	235.77	1.184	12.027
Roches	25	563	134779	186.89	182.00	58.57	0.313	0.573
Massif	57	1619	87601	379.40	364.00	124.97	0.329	1.079

TAB. 3.2: Statistique sur différent type de zones image de 2004

Les mesures des tableaux TAB. 3.2 et TAB. 3.3 révèlent plusieurs faits intéressants :

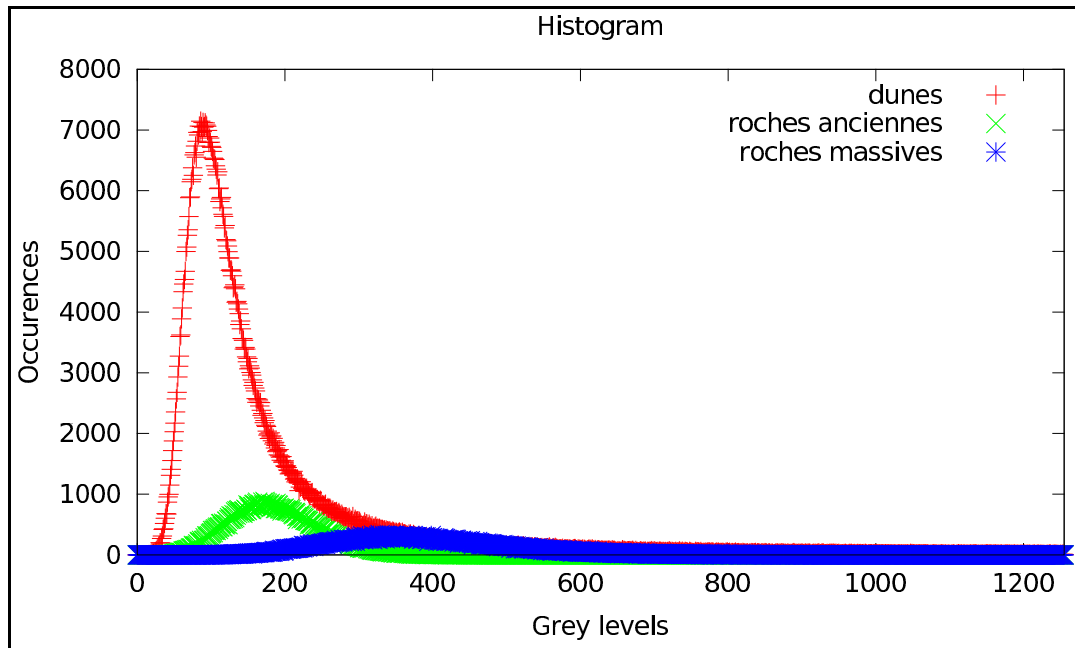


FIG. 3.14: Histogramme de zone de différente sorte sur les images de 2006

- Les valeurs atteintes par les pixels brillants issues des dunes font que les maximum des zones de roches sont beaucoup plus faibles que celles des zones dunaires. Ce fait dénote que ces valeurs sont liées à des effets de géométrie et non à des constructions favorables de speckle. Ceci montre donc bien que des parties de l'ordre de l'échelle d'un pixel orienté favorablement vers le capteur produise ses réflexions.
- l'analyse des moyennes confirme le côté plus brillant des zones de roches récentes. Ceci s'explique sans problème par l'aspect de surface moins érodée des zones volcaniques renforcées par le fait qu'étant en outre situé en hauteur elle subisse moins l'abrasion du sable. En effet, plus le sol est érodé et moins il présente de facette d'orientation favorable aux ondes radar. Nous pouvons aussi penser que le sable présent dans les zones érodées conduit aussi à une atténuation des formes et à une plus grande absorption du signal dans le sol.
- l'analyse des médianes n'apporte rien de bien différent pour les roches mais permet de voir la composition double du signal issu des dunes par le décalage que la médiane de ces dunes a avec la moyenne.
- les autres mesures n'apportent que peu d'information supplémentaire. Le coefficient de variation des zones de roches est conforme aux zones de speckle sur les images SAR 4 look et sa grande valeur sur les dunes provient juste du mélange clair sombre. Le *skeeness*¹ est lui aussi typique de ce type de situation.
- Nous remarquons, comme pour les histogrammes, que les observations sont également stables dans le temps. En effet, l'écart constaté des valeurs est partout proche des fluctuations liées au speckle inhérent aux capteurs radar.

Les mesures statistiques sur nos masques confirment donc les éléments de photo interprétation définis dans la partie précédente. Cela dit, le mélange des pixels sombres et brillants

¹Coefficient d'assymétrie en français

pour les dunes ne nous permet pas de donner une explication sans appel de l'aspect sombre majoritairement présent.

classe	min	max	pop	moy	media	ecart ty	coef var	ske
Image	0	65280	73553616	190.02	162.00	432.94	2.278	103.259
Dunes	11	18797	834877	176.18	120.00	229.62	1.303	12.492
Roches	30	667	124766	187.15	182.00	60.82	0.325	0.546
Massif	60	1689	85201	389.98	374.00	128.11	0.328	1.009

TAB. 3.3: Statistique sur différent type de zones image de 2006.

Afin d'étudier ces derniers pixels nous avons tracé dans nos zones de dunes les parties montante et descendante des dunes. Ce recensement est facilité, par la présence des pixels brillants qui du fait de l'orientation des vents dominants, de notre capteur et de son angle d'incidence ne peuvent se trouver que sur les faces montante et près du sommet. Nous avons ensuite produits des histogrammes (figure 3.15) de ces zones et une série de mesure statistique regroupée dans le tableau TAB. 3.4.

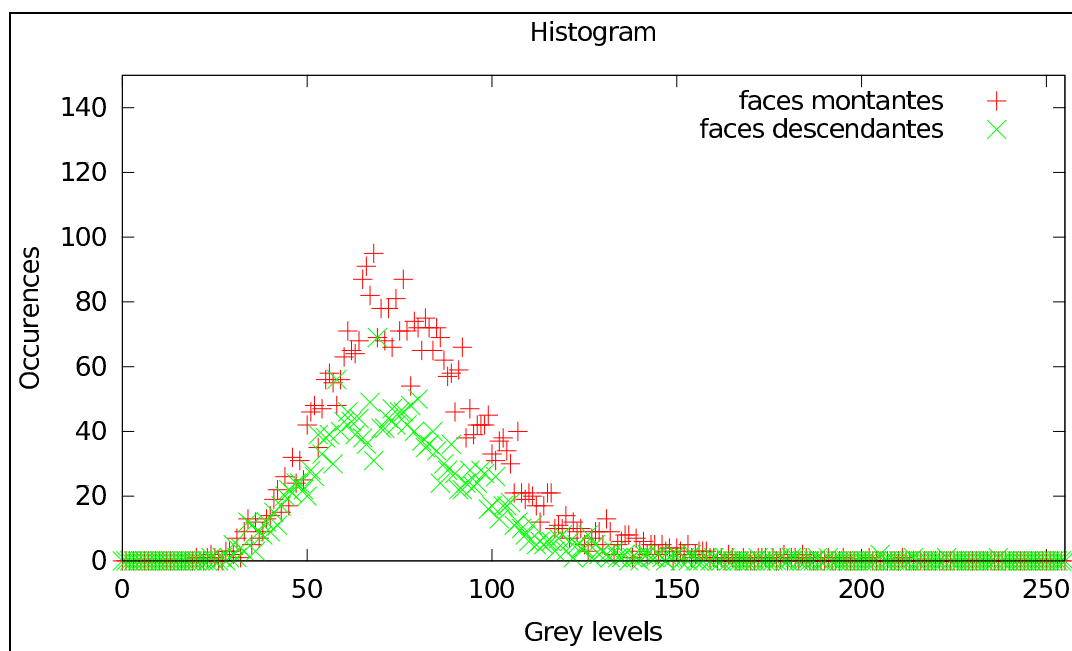


FIG. 3.15: Histogramme de partie de dunes sur les images de 2004.

L'analyse des histogrammes des faces montantes et descendantes nous montre que la seule différence qu'il y a entre ces deux zones est la valeur moyenne des intensités. Les distributions ont la même forme et celles-ci sont typiques de loi correspondant au speckle pleinement développé. L'analyse des mesures statistiques fait aussi ressortir des chiffres proches du speckle pleinement développé vu en trois en imagerie SAR 3 look.

Une première conclusion que nous pouvons tirer de ses chiffres est que les dunes de cette partie du Tibesti vu par ENVISAT ASAR ne comportent que très peu de pixels dans l'ombre.

classe	min	max	pop	moy	media	ecart ty	coef var	ske
Montant	20	211	4118	79.03	76.00	23.79	0.301	0.889
Descendant	24	237	2367	75.07	73.00	22.92	0.305	1.190

TAB. 3.4: Statistique de partie de dunes sur les images de 2004.

En effet, toutes les mesures statistiques sont convergentes sur le fait que les distributions des pixels issues des dunes ne sont pas Gaussiennes. Hors, les parties des dunes vont se retrouver dans des zones d'ombres portées qui, par définition, ne sont pas éclairées par le radar. Ceci fait qu'elles donnent un signal très faible marqué uniquement par le fond de signal atmosphérique, ce qui donne un signal de profil Gaussien, quelque soit le nombre de looks de l'image. Il ne sera donc pas possible de détecter la présence de dune en recherchant la juxtaposition de partie à réponse Gaussienne et de point brillant. Bien évidemment cette absence d'ombre dans les images pourrait-être remise en question par un angle d'incidence plus rasant et/ou une résolution d'image plus fine.

La différence de moyennes entre les faces montantes et descendantes montre qu'il sera difficilement séparable d'un point de vue de l'intensité. Cela dit, il sera possible d'utiliser la sommation du signal montant et descendant pour reconstruire la forme des dunes mais à condition de s'affranchir de l'effet des points brillants.

D'un point de vue de la mesure d'une valeur représentative des pixels issus d'un champ de dune il est par contre clair que la moyenne sur des fenêtres simples ne peut pas convenir mais que la recherche de forme de moyenne homogène pourrait fonctionner.

3.4 Possibilités de détection

Toutes les mesures prises ici et les procédés de formation des images nous permettent d'affirmer que les zones de dunes tranchent sur les zones de roche par différentes caractéristiques dont :

- Forte occurrence de réflexion spéculaire.
- Distribution du signal très dissymétrique.
- Majorité de pixel très sombre.
- Très peu d'ombres.
- Coefficient de variation très élevé, caractéristique d'un fort mélange de valeur forte et faible.
- Une différence entre les zone montante et descendante des dunes faibles mais mesurables.
- Une quasi isotropie des dunes relativement à l'angle de visée même s'il faudrait tester cela sur d'autre zone pour en être totalement certain.

Ces caractéristiques, dont nous avons pu constater qu'elles sont stables dans le temps nous permettent donc d'orienter notre recherche de traitement vers une exploitation de ces résultats afin de caractériser les dunes et leur déplacement. Nous nous sommes donc orientés

dans les sens de trouver des méthodes basées soit sur des mesures statistiques simples, réalisées séparément sur les images et exploitant le coté directionnel ou bien sur des mesures plus complexe afin de détecter les zones de dunes et ensuite leur éventuelle modification. Cette étude est l'objet des deux chapitres suivants.

3.5 Conclusion

L'analyse des images SAR du désert du Tibesti a permis de caractériser les régions similaires de la zone d'étude à travers un certain nombre des mesures. Les caractéristiques que nous avons pu identifier portent sur les zones des dunes. Les mesures sont stables dans les deux images à travers les graphes d'histogrammes et les mesures statistiques obtenues.

Nous avons aussi noté que les mesures statistiques des histogrammes de faces montantes et descendantes sont convergentes. Elles prouvent que les distributions des pixels issues de dunes ne sont pas Gaussiennes. L'étude menée nous a donc aidé de caractériser les dunes et leur déplacement, cf. chapitre [5](#), page [103](#).

Tableaux

3.1	Nombre de pixels brillants sur un quadriage régulier	65
3.2	Statistique sur différent type de zones image de 2004	67
3.3	Statistique sur différent type de zones image de 2006.	69
3.4	Statistique de partie de dunes sur les images de 2004.	70

Figures

3.1	Carte du désert du Tibesti extrait de Google map, centre du site	52
3.2	Image du désert du Tibesti extrait de Google map	53
3.3	Désert du Tibesti/partie la plus dense de la ville de Zouar	54
3.4	Image optique de notre zone d'étude/Google map	55
3.5	Images ASAR ENVISAT de notre zone d'étude au sud du massif du Tibesti	57
3.6	Piste sur Image optique traverser de sable (source google)	58
3.7	Piste sur Image ASAR 2004 envisat traverser de sable	58
3.8	Piste sur Image ASAR 2006 envisat traverser de sable	58
3.9	Modèle de rétrodiffusion de dunes en imagerie SAR satellitaire.	61
3.10	Champ de dunes en image optique et SAR	62
3.11	Point brillant d'un Champ de dunes en imagerie SAR ENVISAT	64
3.12	Déplacement de points brillant dans une zone de dunes/(exagéré 10 fois) .	66
3.13	Histogramme de zone de différente sorte sur les images de 2004	67
3.14	Histogramme de zone de différente sorte sur les images de 2006	68
3.15	Histogramme de partie de dunes sur les images de 2004.	69

Méthodes de traitement d'images sur laquelle la détection peut s'appuyer

La détection des changements consiste à analyser et comparer des séquences d'images de la même scène pour extraire les zones qui ont subi des changements au cours du temps. Nous faisons ici une revue de ces techniques (méthodes de traitement d'images) en évaluant leur pertinence dans notre problématique.

Sommaire

4.1	Transformation ponctuelle	73
4.2	Transformée de Fourier et changement des formes	76
4.3	Test sur des données de Tibesti	90
4.4	Conclusion	100

4.1 Transformation ponctuelle

En traitement d'images, il existe trois grands types d'opérations de transformation ponctuelle : la *transformation pixel à pixel*, la *transformation locale vers un pixel* et enfin, la *transformation globale vers un pixel*.

Dans la suite :

- ◇ I : désigne une image d'entrée,
- ◇ I' : l'image de sortie résultante,
- ◇ $P(m, n)$: un pixel de l'image I en coordonnées (m, n) et,
- ◇ $P'(m', n')$: un pixel de l'image I' généré par la transformation.

4.1.1 Transformation pixel à pixel

Elle est telle que $P'(m', n')$ de I' dépende uniquement du pixel $P(m, n)$ de I . Précisément, les coordonnées (m', n') sont égales aux coordonnées de (m, n) . Un exemple classique de ce type de transformation, c'est celui du seuillage d'images, formulé par la relation ci-dessous :

$$I'(x, y) = \begin{cases} \beta_1 & \text{si } I(x, y) \geq \alpha \\ \beta_2 & \text{sinon} \end{cases}$$

j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	19
1	11	20	30	1	14
2	59	1	23	15	15
3	17	0	40	17	71
4	21	56	47	2	87

j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	99
1	11	20	30	1	14
2	59	1	23	15	15
3	17	0	40	17	71
4	21	56	47	2	87

TAB. 4.1: Exemple de traitement pixel à pixel

Dans le tableau TAB. 4.1, à gauche se trouve la matrice de l'image en entrée : chaque pixel est indiqué par sa valeur radiométrique. Le pixel initial choisi p_i de valeur 19 est en rouge et de coordonnées (4,0). À droite se trouve le résultat du codage correspondant où le pixel concerné est coloré en bleu. Le pixel résultat obtenu est de valeur 99 et est en bleu, en supposant que le seuillage donnera 99(β_1) à tout pixel de valeur supérieure à 18(α) et 0(β_2) sinon.

j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	19
1	11	20	30	1	14
2	59	1	23	15	15
3	17	0	40	17	71
4	21	56	47	2	87

j/i	0	1	2	3	4
0	0	99	0	0	99
1	0	99	99	0	0
2	99	0	99	0	0
3	0	0	99	0	99
4	99	99	99	0	99

TAB. 4.2: Extension de TAB.4.1

4.1.2 Transformation locale vers un pixel

Dans ce type de transformation, la valeur d'un pixel de l'image résultante I' dépend d'un ensemble de pixels de l'image en entrée I pris au sein d'un voisinage F . F est constitué d'un nombre limité de pixels localisés autour du pixel initial $p_i(m, n)$ de l'image d'entrée I . En outre, $p_i(m, n)$ constitue le centre du voisinage F .

Ce voisinage F est de forme quelconque, mais souvent choisi rectangulaire pour diminuer la complexité des calculs. Elle peut être un bloc rectangulaire, une barrette verticale, une barrette horizontale, une barrette diagonale, ... de taille dépendante du rayon du voisinage spécifié autour de p_i et qui conserve sa forme et sa taille quelles que soient les coordonnées du point p_i .

Dans le tableau TAB. 4.3, à gauche se trouve la matrice de l'image en entrée : chaque pixel est indiqué par sa valeur radiométrique. Le pixel initial p_i choisi de valeur 23 est en

j/i	0	1	2	3	4	j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	19	0	14	56	18	18	19
1	11	20	30	1	14	1	11	20	30	1	14
2	59	1	23	15	15	2	59	1	40	15	15
3	17	0	40	17	71	3	17	0	40	17	71
4	21	56	47	2	87	4	21	56	47	2	87

TAB. 4.3: Transformation locale vers un pixel

bleu et de coordonnées $(2, 2)$. À droite se trouve le résultat du codage correspondant à la fenêtre $F(2, 2)$ de rayon 1 où les pixels concernés sont colorés en orange autour du pixel p_i . Le pixel résultat obtenu est de valeur 40 et est en rouge, en supposant que le codage donnera le maximum.

j/i	0	1	2	3	4	j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	19	0	56	56	56	30	19
1	11	20	30	1	14	1	59	59	56	30	19
2	59	1	23	15	15	2	59	59	40	71	71
3	17	0	40	17	71	3	59	59	56	87	87
4	21	56	47	2	87	4	56	56	56	87	87

TAB. 4.4: Extension de TAB. 4.3

4.1.3 Transformation globale vers un pixel

La valeur calculée d'un pixel $P'(m', n')$ de l'image résultante I' dépend de la totalité des pixels de l'image d'entrée I . Ce cas peut arriver lorsque l'on transforme globalement l'image du domaine spatial vers le domaine fréquentiel. Des exemples bien connus sont la transformation de Fourier discrète (TFD) ou la transformation en cosinus discrète (TCD) où chaque composante fréquentielle est fonction de l'ensemble des pixels de l'image à transformer.

16	56	18	18	16	56	18	18	27	2	40	2
11	20	30	1	11	20	30	1	11	20	30	1
59	1	23	15	59	1	23	15	59	1	23	15
17	0	40	17	17	0	40	17	17	0	40	17
21	56	47	2	21	56	47	2	21	56	47	2

TAB. 4.5: Transformation en ligne

Dans le tableau TAB. 4.5, à gauche se trouve la matrice de l'image en entrée : chaque pixel est indiqué par sa valeur radiométrique. Au centre, on indique la ligne initiale choisie

de couleur **rouge**. À droite se trouve le résultat du codage correspondant à la ligne choisie où les pixels concernés sont colorés en **bleu**. Les pixels résultats obtenus sont de couleurs bleues. Pour de plus amples détails sur la méthode de calcul de valeurs radiométriques des pixels résultats de l'image en sortie, il faut voir l'équation (4.3) de la section 4.2.4.

On peut facilement généraliser les résultats du tableau TAB.4.5 par le tableau TAB. 4.6.

16	56	18	18	16	56	18	18	27	2	40	2
11	20	30	1	11	20	30	1	15	19	20	19
59	1	23	15	59	1	23	15	24	36	66	36
17	0	40	17	17	0	40	17	18	23	40	23
21	56	47	2	21	56	47	2	31	26	10	26

TAB. 4.6: Extension de TAB. 4.5

Le tableau TAB. 4.7 présente les caractéristiques indispensables au traitement ponctuel décrit ci-dessus :

- ◇ taille image : $N * M$,
- ◇ taille du voisinage : $n_1 * p_1$,
- ◇ complexité : en nombre d'opérations par pixels.

Opération	Caractérisation	Complexité par pixel
Pixel	La valeur de sortie, à une coordonnée spécifique, dépend uniquement de la valeur d'entrée à la même coordonnée.	1
Locale	La valeur de sortie, à une coordonnée spécifique, dépend des valeurs d'entrée dans le voisinage de cette même fenêtre.	$n_1 * p_1$
Globale	La valeur de sortie, à une coordonnée spécifique, dépend de toutes les valeurs de l'image d'entrée.	$N * M$

TAB. 4.7: Caractérisation de ces trois types de transformations

4.2 Transformée de Fourier et changement des formes

4.2.1 Calcul de la DFT discrète

La transformée de Fourier discrète (DFT : Discrete Fourier Transform) permet de calculer la transformée de Fourier d'une suite d'échantillons au lieu d'une fonction continue. L'échantillonnage puis l'utilisation de la DFT est le moyen le plus simple de calculer la transformée de Fourier d'un signal réel. On la définit à partir de la formule classique connue

comme suit :

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} X[k] \exp[(-2\pi/n)i]jk] \quad (4.1)$$

- ◇ $(X[k])$ est la suite des échantillons temporels,
- ◇ (f_j) la suite des échantillons fréquentiels,
- ◇ n est le nombre des échantillons temporels,
- ◇ i est le nombre imaginaire telque $i^2 = -1$,
- ◇ j désigne l'indice de la suite des échantillonnages f_j , et
- ◇ k la variable de sommation.

4.2.2 La transformée de Fourier rapide : FFT

Un algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT : Fast Fourier Transform) permet de calculer la DFT avec une complexité minimale. En effet, pour une application littérale de la DFT, on obtient une complexité de calcul de l'ordre de $O(n^2)$. Les buts des algorithmes de FFT est de décomposer la transformation afin d'obtenir une complexité en $O(n \log_2(n))$, permettant ainsi sa réalisation en temps acceptable par des ordinateurs d'une puissance de calcul raisonnable.

Il existe différents algorithmes de la FFT. Le plus connu et le plus utilisé est celui de type de Cooley-Tukey (appelé aussi à entrelacement temporel ou à « decimation in time »)[62] qui réduit la complexité à $n \log_2(n)$.

Il existe deux versions de l'algorithme :

- ◇ FFT avec entrelacement temporel,
- ◇ FFT avec entrelacement fréquentiel.

L'algorithme nécessite que n soit une puissance de 2. Le principe consiste à décomposer le calcul de la TFD d'ordre $n = 2^l$, en l étapes successives.

4.2.2.1 FFT avec entrelacement temporel

Par souci de simplicité, nous illustrons le principe de la méthode par un exemple d'une suite temporelle $X[k]$ de taille $n = 4$ en dimension 1.

Les données sont stockées dans un vecteur $X[n]$ et notées x_k , la suite de la TFD est défini par un vecteur $f[n]$ dont les données sont notées f_j . On pose par souci de clarté $w = e^{-i2\pi/n}$, c'est-à-dire $w = e^{-i2\pi/4}$ pour notre cas.

Il va sans dire pour $n = 4$ que :

- ◇ $w^0 = w^4 = 1$
- ◇ $w^2 = -1$.

De ce qui précède, la suite TFD s'écrit comme suit :

- ◇ $f_0 = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 = (x_0 + x_2) + (x_1 + x_3)$
- ◇ $f_1 = x_0 + w^1x_1 + w^2x_2 + w^3x_3 = (x_0 - x_2) + w^1(x_1 - x_3)$
- ◇ $f_2 = x_0 + w^2x_1 + w^4x_2 + w^6x_3 = (x_0 + x_2) - (x_1 + x_3)$

$$\diamond f_3 = x_0 + w^3x_1 + w^6x_2 + w^9x_3 = (x_0 - x_2) - w^1(x_1 - x_3)$$

Les données $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ sont regroupées en deux paquets : un paquet formé des données d'indices pairs $(x_0, x_2, x_4, \dots, x_{n-2})$ et un paquet formé des données d'indices impairs $(x_1, x_3, x_5, \dots, x_{n-1})$. Ce qui donne pour un $n = 4$, un paquet (x_0, x_2) et un paquet (x_1, x_3) . Puis sur chaque paquet on effectue une DFT d'ordre $n/2$ et on combine les résultats de ces DFT pour obtenir celle d'ordre n . À titre illustratif, lorsque $n = 4$, ça donne la figure FIG.4.1.

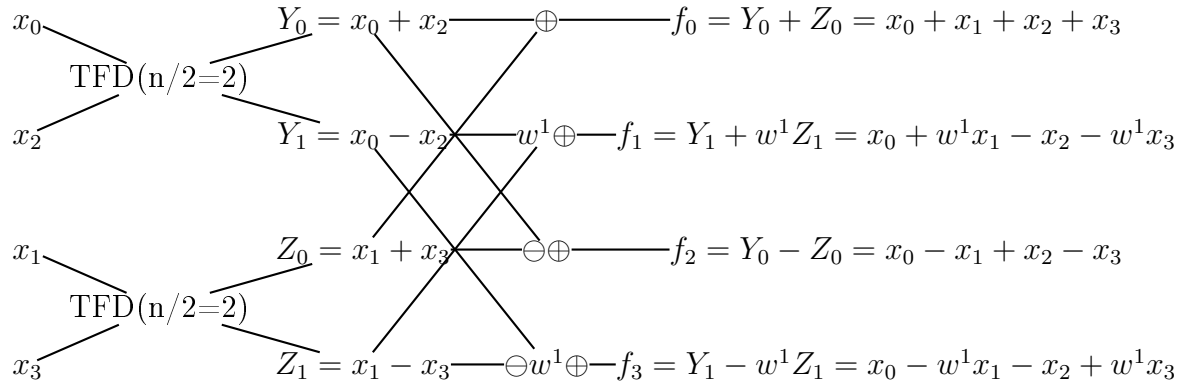


FIG. 4.1: Construction de f_j : étage de papillon

Pour obtenir les quatre valeurs f_j de la figure FIG.4.1, il suffit de calculer 2 TFD d'ordre $n/2$ et de combiner les résultats deux à deux à l'aide d'une addition et d'une multiplication au maximum, pour chaque valeur f_j . Cette étape est appelée « étage de papillon », liée à la forme du schéma de calcul.

Ce résultat se généralise assez facilement pour tout $n = 2^l$ où l est un entier strictement positif. La méthode peut être réitérée l fois et calculer la TFD d'ordre n à l'aide de l étages de $n/2$ papillons, avec $l = \log_2(n)$. La complexité de calcul d'une TFD d'ordre n devient alors celle de l étages de $n/2$ papillons, soit

$$\begin{cases} l \frac{n}{2} = \log_2(n) \frac{n}{2} \text{ multiplications complexes} \\ ln = \log_2(n)n \text{ additions complexes} \end{cases}$$

au lieu de faire classiquement :

$$\begin{cases} n^2 \text{ multiplications complexes} \\ n(n-1) \text{ additions complexes} \end{cases}$$

Cet algorithme est connu sous le nom de l'algorithme de la FFT avec **entrelacement temporel** (base 2) de Cooley-Tukey [62], [63].

Ainsi, pour $n = 1024 = 2^{10}$, le calcul classique demande :

◇ $n^2 = 1048576$ multiplications

◇ $n(n-1) = 1024 \cdot 1023 = 1047552$ additions

tandis que le calcul avec l'algorithme de la FFT demande :

◇ $\log_2(n) \frac{n}{2} = 10 \cdot 512 = 5120$ multiplications

◇ $\log_2(n)n = 10 \cdot 1024 = 10240$ additions

L'algorithme divise environ par 200 le nombre de multiplications à effectuer. L'efficacité de la FFT augmente sans nul doute avec la valeur de n . Pour $n = 4$, le schéma complet de l'algorithme est donné à la figure FIG.4.2, page 79.

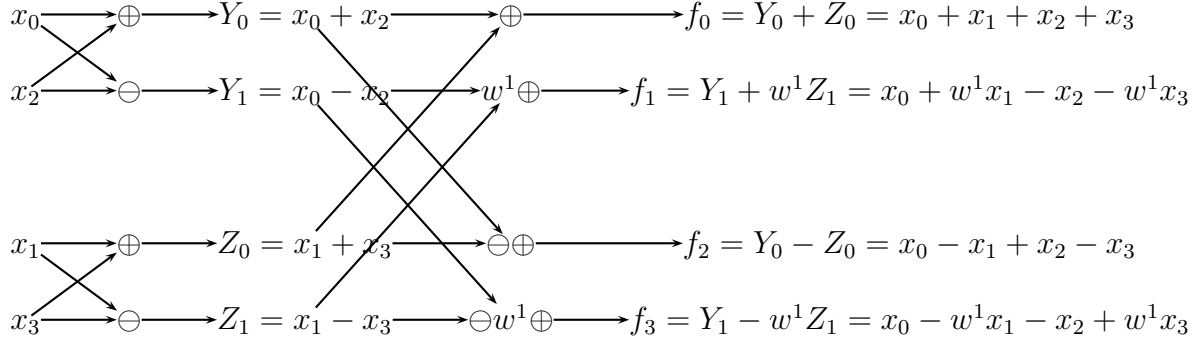


FIG. 4.2: Schéma complet de l'algorithme temporel de Cooley-Tukey

Nous remarquons que dans ce schéma les données temporelles en entrées x_i sont désordonnées, par contre celles de sortie f_j sont dans l'ordre naturel de choses. De ce fait, cet algorithme de FFT s'appelle FFT avec entrelacement temporel.

4.2.2.2 FFT avec entrelacement fréquentiel

Cet algorithme est symétrique du précédent. Les données temporelles x_i restent dans l'ordre naturel, tandis que les résultats f_j sont désordonnés.

Le principe consiste encore à décomposer le calcul de la TFD d'ordre $n = 2^l$ en l étapes successives. Mais le regroupement de données se fait différemment.

Les données fréquentielles $(f_0, f_1, f_2, \dots, f_{n-1})$ sont regroupées en deux blocs : un bloc formé de données d'indices pairs $(f_0, f_2, f_4, \dots, f_{n-2})$ et un bloc formé d'indices impairs $(f_1, f_3, f_5, \dots, f_{n-1})$. Ainsi, pour $n = 4$ on aura un bloc (f_0, f_2) et un bloc (f_1, f_3) . De même pour $n = 8$ on aura un bloc (f_0, f_2, f_4, f_6) et un bloc (f_1, f_3, f_5, f_7) .

De façon analogue que le cas de données temporelles, pour $n = 4$ on peut écrire :

◇ $f_0 = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 = (x_0 + x_2) + (x_1 + x_3)$

◇ $f_2 = x_0 + w^2x_1 + w^4x_2 + w^6x_3 = (x_0 + x_2) - (x_1 + x_3)$

◇ $f_1 = x_0 + w^1x_1 + w^2x_2 + w^3x_3 = (x_0 - x_2) + [w^1(x_1 - x_3)]$

◇ $f_3 = x_0 + w^3x_1 + w^6x_2 + w^9x_3 = (x_0 - x_2) - [w^1(x_1 - x_3)]$

Pour obtenir chaque bloc de résultats fréquentiels, on effectue une DFT d'ordre $n/2$ sur les données résultant d'une étape de papillons sur les données x_i .

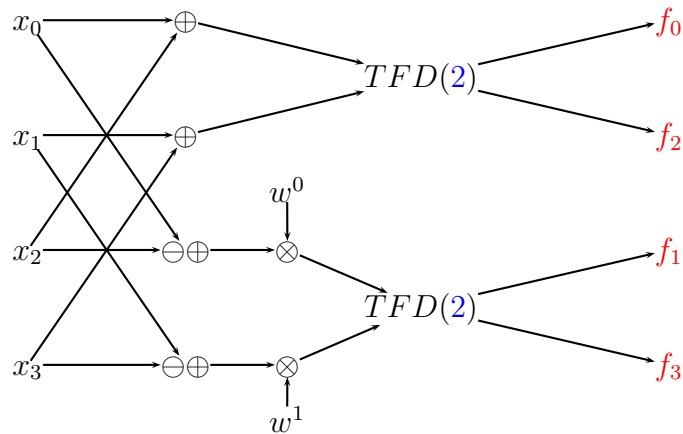


FIG. 4.3: Schéma complet de l'algorithme fréquentiel de Cooley-Tukey

On a donc un étage de 2 papillons suivi d'un étage de 2 DFT d'ordre $n/2 = 2$. Ce résultat se généralise, pour plus de détails, le lecteur est invité à se pencher sur le livre de G. BAUDIN [62].

Par ailleurs, il faut souligner qu'il est souvent utile dans certains cas de préparer les données avant la transformée de Fourier. La technique consiste à multiplier le signal temporel par une fonction de temps. On nomme cette technique "**apodisation**". Le résultat dans le spectre sera bien sûr la convolution de toutes les raies par la transformée de Fourier de la fonction d'apodisation (filtrage).

À cause de la coupure fréquentielle abrupte introduite par des parasites, il est nécessaire d'utiliser des fenêtres d'apodisation pour limiter les effets de cette discontinuité et notamment les oscillations de Gibbs dans les images reconstruites [64].

En réalité, il existe plusieurs types de fenêtre d'apodisation, notamment [65] :

- ◇ fenêtre rectangulaire,
- ◇ fenêtre triangulaire,
- ◇ fenêtre de hanning,
- ◇ fenêtre de hanning avec recouvrement,
- ◇ fenêtre de Blackman,
- ◇ fenêtre de flat-top,
- ◇ fenêtre de Kaiser-Bessel, et
- ◇ fenêtre exponentielle.

Le choix de la fenêtre à utiliser dépend des objectifs et des exigences de la résolution spatiale et de sensibilité radiométrique. Toutefois, l'apodisation a un coût. L'atténuation de ces oscillations s'accompagne nécessairement d'une certaine dégradation de la résolution spatiale. Le lecteur intéressé par le sujet pourra éventuellement consulter les documents [64], [65].

Il est question dans la partie qui va suivre de regarder, dans un premier temps, les différents types de changements qui peuvent surgir en utilisant la FFT. Le problème de la transformée de Fourier est qu'elle est définie sur des espaces infinis, tandis que les images réelles ne le sont pas. Cependant, ceci n'est pas un handicap majeur. Il existe des procédures ou du moins de moyens en discrétisation finie, pour pouvoir appliquer la transformée de Fourier à une suite finie de données temporelles ou spatiales d'échantillonnage, notamment l'image bidimensionnelle (2D). Le lecteur intéressé par de détails, peut consulter par exemple l'ouvrage de J.M. Vézien [66].

4.2.3 Préambule

Soit I une image. $I(x, y)$ représentera une fonction d'amplitude de deux variables réelles dans le plan cartésien. Les amplitudes dans une image donnée peuvent être des nombres entiers ou réels. Il arrive que les mesures physiques produisent une image complexe, avec phase et amplitude. Dans la suite, nous nous limiterons au cas d'amplitudes réelles.

Une image digitale $I[m, n]$ décrite dans un espace discret de dimension 2 est dérivée d'une image $I(x, y)$ dans un espace $2D$ continue par un processus d'échantillonnage que l'on désigne fréquemment par le terme numérisation ou digitalisation. L'image continue $I(x, y)$ est divisée en nl rangées ou lignes et np colonnes. L'intersection d'une ligne et d'une colonne est dénommée pixel. Les valeurs affectées aux coordonnées $[p, l]$ avec $p \in \{0, 1, 2, \dots, np-1\}$ et $l \in \{0, 1, 2, \dots, nl-1\}$ sont $I[p, l]$. Dans la pratique $I(x, y)$ considérée comme le signal reçu par le capteur est une fonction à nombreuses variables, telles que la profondeur (β), la longueur d'onde (λ) et le temps (t). Formellement, I s'écrit $I(x, y, \beta, \lambda, t)$. Sauf exception explicite, nous considérerons seulement le cas d'image $2D$ où seules les valeurs radiométriques sont prises en compte.

Cependant, il existe des valeurs standards pour les différents paramètres rencontrés en traitement d'image. Elles prennent leurs origines des spécifications algorithmiques, des contraintes *hardware* ou des standards vidéo. Le tableau TAB. 4.8, page 81 en donne quelques unes.

Paramètre	Symbole	Valeurs typiques
Lignes	nl	256, 512, 525, 576, 625, 720, 1024, 1080
Colonnes	np	256, 512, 768, 1024, 1920
Niveaux	L	2, 64, 256, 1024, 4096, 16384, 2 ²⁴

TAB. 4.8: Paramètres d'images numériques [66]

Jusqu'à une date récente, on trouvait souvent des résolutions $np = nl = 2^k$ avec $k \in \{8, 9, 10\}$. La raison est due aux contraintes des circuits intégrés ou l'utilisation de certains algorithmes comme la FFT. Le nombre de niveaux distingués dans l'image est aussi une puissance de 2, c'est-à-dire $L = 2^b$ où b est le nombre de bits dans la représentation binaire de ces niveaux. Quand $b > 1$, on parle d'image en niveaux de gris. Lorsque $b = 1$ on a une image binaire.

4.2.4 Calcul de suites des échantillons fréquentiels

Notre objectif est d'élaborer le lien existant entre la suite des échantillons temporels et celle des échantillons fréquentiels à partir de la relation connue en 1D.

Il faut noter que, dans les cas des fonctions réelles, la partie imaginaire (suivant la composante sinus) est nulle. Par conséquent, l'équation (4.1) établie à la page 77 dévient (4.2) :

$$f_j = \sum_{k=0}^{np-1} X[k] \cos((2\pi/np)j * k) \quad (4.2)$$

L'équation ainsi obtenue en (4.2) peut générer les $f[n]$ à partir des $X[n]$. Cependant, Il faut remarquer que les termes f_j sont symétriques à partir de terme du milieu f_m , où m représente la valeur de $n/2$. Ainsi, lorsque $n = 8$, on obtient la figure FIG. 4.4.

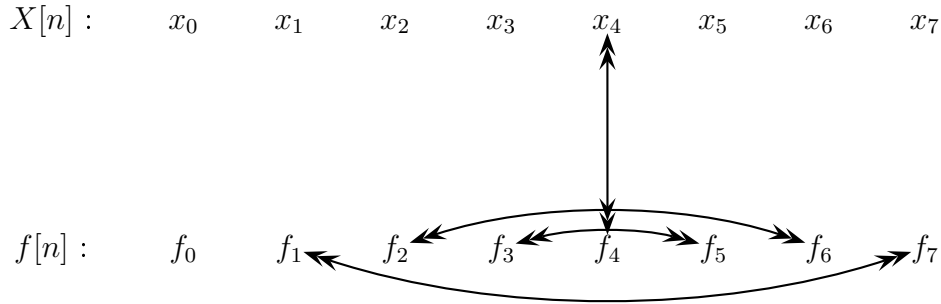


FIG. 4.4: Construction simplifiée de f_i en 1D

Pour $n = 16$, les f_j seront construites par le schéma de la figure FIG. 4.5 :

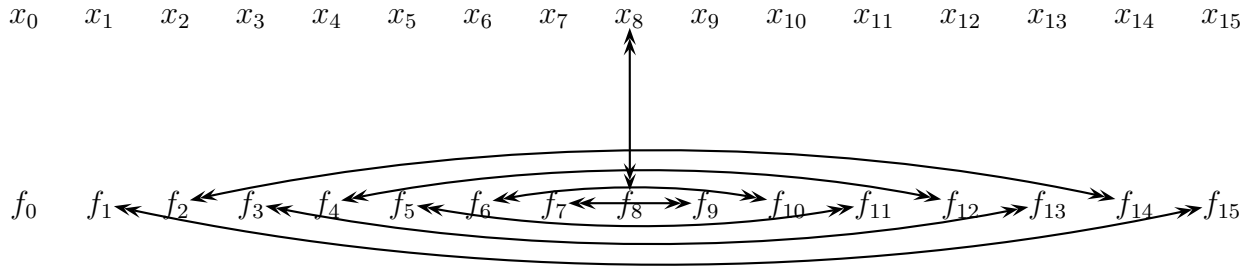


FIG. 4.5: Construction généralisée de f_i en 1D

À titre indicatif, nous pouvons donner un codage simplifié de la FFT en 1D. Ainsi, le schéma de la figure FIG. 4.6 illustre ce propos.

En entrée, on a les données temporelles représentées par $X[i]$ et en sortie les données fréquentielles représentées par $f[i]$.

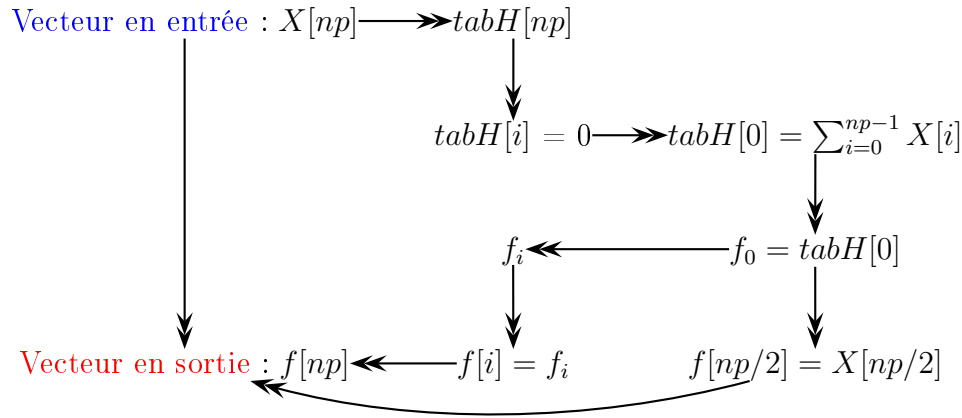
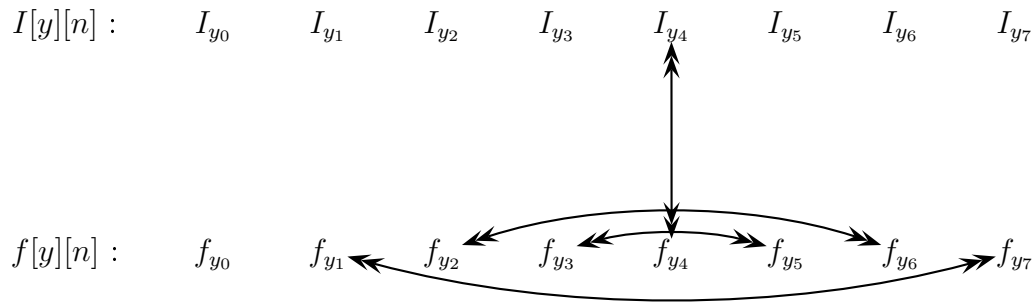


FIG. 4.6: Codage simplifié de la FFT en 1D

FIG. 4.7: Construction simplifié de f_{ji} en 2D

4.2.4.1 Calcul de la DFT dans le cas bidimensionnel

Dans le même ordre d'idée, on peut élaborer un modèle pour des fonctions réelles et notamment sur l'image I discrétisée sur $nl * np$ échantillons. Ainsi donc, par analogie à l'équation (4.2), établie en page 82, en 2D on obtient l'équation (4.3).

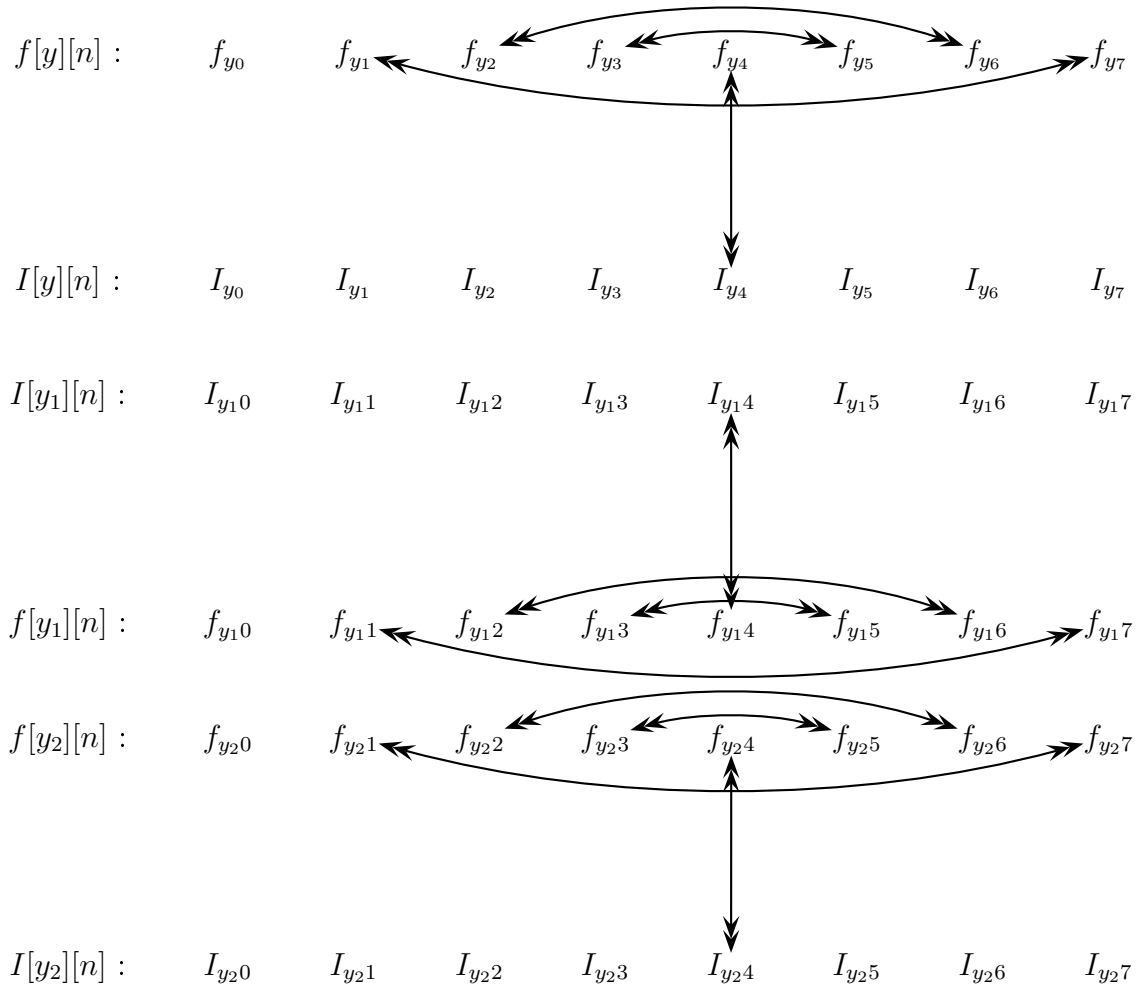
$$f_{ji} = \sum_{k=0}^{np-1} I[j][k] * \cos((2\pi/np) * i * k) \quad (4.3)$$

Appliquée à notre cas de figure, on pourra formaliser la situation par une ébauche de modèle régissant la situation par la figure FIG. 4.7, page 83.

Plus en avant, on pourra généraliser assez facilement le schéma de la figure FIG.4.7 par le schéma de la figure FIG. 4.8, page 84.

4.2.4.2 Application de la FFT dans notre cas

La procédure basique ci-dessous décrite, prend en compte le fait que np (respectivement nl) est une puissance entière de 2. Par souci de simplicité, nous nous sommes limités à $np = nl = n = 8 = 2^3$ afin d'illustrer notre propos.

FIG. 4.8: Construction généralisée de f_{ji} en 2D

Dans le but de formaliser notre modèle afin de l'implémenter par la suite, nous nous limitons à la première moitié de l'image, c'est-à-dire $x < np/2$. Ensuite, on calcule les données fréquentielles de la première moitié et par symétrie nous construisons l'autre moitié de l'image, voir figure FIG. 4.9.

Dans les deux sections qui suivent, nous essayons de combiner la FFT à la distance de Mahalanobis. En effet, la distance de Mahalanobis est une mesure introduite par **Prasanta Mahalanobis** en 1936. Elle repose sur la corrélation entre deux variables par lesquelles différents modèles peuvent être identifiés et analysés.

Elle diffère de la distance euclidienne par le fait qu'elle prenne en compte la corrélation de la serie de données. Elle donne un poids moins important aux composantes les plus bruitées. Distance, souvent utilisée pour la détection de données aberrantes dans un jeu de données, ou bien pour déterminer l'homogénéité de données fournies par un capteur.

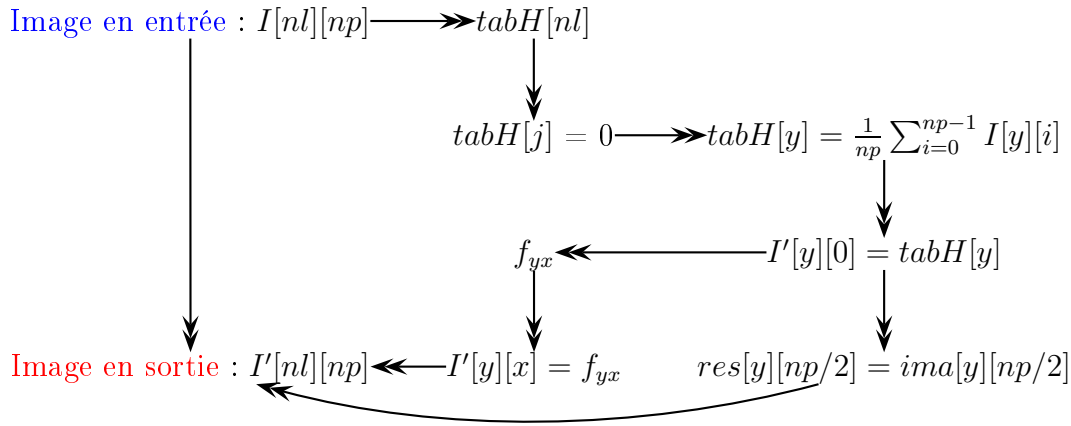


FIG. 4.9: Codage simplifié de la FFT en dimesion 2

Dans notre cas d'étude, et en ce qui nous concerne, nous avons identifié deux grands modèles de fréquence de l'image :

- ◇ fréquence de l'image en ligne,
- ◇ et fréquence de l'image en colonne, qui à notre avis est sans grand intérêt, du fait que le satellite filme latéralement et balaye la surface de la Terre du Nord-Sud (ou inversement).

Chaque modèle aura cinq sous modèles. Ces différents sous modèles que nous avons détectés seront analysés, formalisés, implémentés et discutés.

4.2.5 Fréquences de l'image : horizontalement

L'idée principale consiste à construire un tableau à une dimension **tabH** ayant le même nombre d'éléments que le nombre de lignes de l'image en entrée. Ensuite, nous mettons dans chaque composante du tableau $tabH$ la moyenne correspondante à la FFT de ligne candidate.

Nous nous limitons aux cinq sous-cas, que nous estimons les plus fréquents.

En ligne

Dans ce cas, tous les pixels d'une ligne y quelconque auront la même valeur radiométrique que **tabH**[y]. Ces différentes valeurs sont données par l'équation (4.4).

$$I'[y][x] = tabH[y] \quad (4.4)$$

Ainsi, l'image en sortie dégagera la tendance horizontale globale. Le modèle sera régi par la figure FIG. 4.10.

Pour mettre au profit la corrélation suivant un pixel courant de la ligne nous utilisons la distance de Prasanta par rapport à la moyenne de la ligne courante.

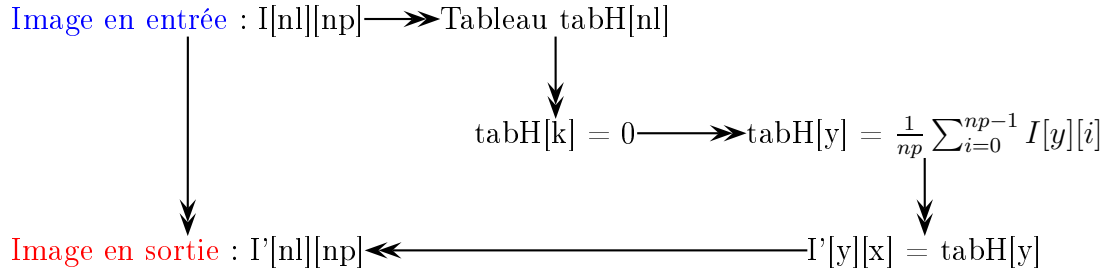


FIG. 4.10: Fréquence de l'image en ligne

De Prasanta : ligne

Dans ce cas, en sortie, tout pixel d'une ligne y quelconque aura pour valeur radiométrique la valeur absolue de la différence de $tabH[y]$ et $I[y][x]$, c'est à dire $abs(tabH[y] - I[y][x])$. Ces différentes valeurs sont données par l'équation (4.5).

$$I'[y][x] = abs(tabH[y] - I[y][x]) \quad (4.5)$$

Ainsi, le modèle sera régi par le schéma de la figure FIG.4.11.

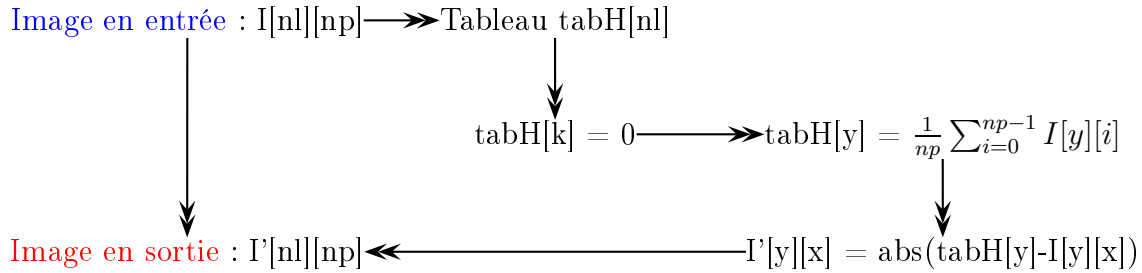


FIG. 4.11: Fréquence de l'image par rapport à la moyenne de Prasanta

Pour mettre au profit la corrélation dominante suivant un pixel optimal de la ligne nous utilisons la distance de Prasanta par rapport à la moyenne de la ligne courante.

Locale de Prasanta : ligne

Dans ce cas, en sortie, tout pixel d'une ligne y quelconque aura pour valeur radiométrique la valeur maximale de la différence de $tabH[y] - I[y][x]$ et 0, c'est à dire $Max(tabH[y] - I[y][x], 0)$. Ces différentes valeurs sont données par l'équation (4.6).

$$I'[y][x] = Max(tabH[y] - I[y][x], 0) \quad (4.6)$$

Ainsi, le modèle sera régi par le schéma de la figure FIG.4.12.

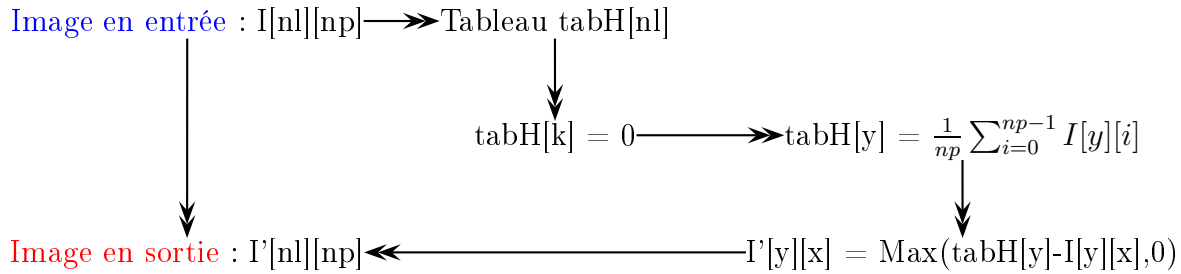


FIG. 4.12: Fréquence de l'image par rapport à la moyenne locale de Prasanta

Il faut noter au passage qu'on pouvait émettre l'hypothèse qui consiste à procéder pour notre modélisation en écrivant la fonction objectif ainsi : $Max(I[y][x] - tab[y], 0)$, privilégiant un choix local pixelisé. Il faut souligner que, la fonction objectif ainsi écrite n'est rien d'autre que celle obtenue à la figure FIG. 4.12 présentée autrement.

Afin d'opérer un choix optimal entre la corrélation dominante et celle suivant un pixel, nous mettons sur pied le codage "De Prasanta à point : ligne".

De Prasanta à point : ligne

Dans ce cas, en sortie, tout pixel d'une ligne y quelconque aura pour valeur radiométrique la valeur maximale de la différence de $tabH[y] - I[y][x]$ et $I[y][x]$, c'est à dire $Max(tab[y] - I[y][x], I[y][x])$. Ces différentes valeurs sont données par l'équation (4.7).

$$I'[y][x] = Max(tabH[y] - I[y][x], I[y][x]) \quad (4.7)$$

Ainsi, le modèle sera régi par la figure FIG.4.13 :

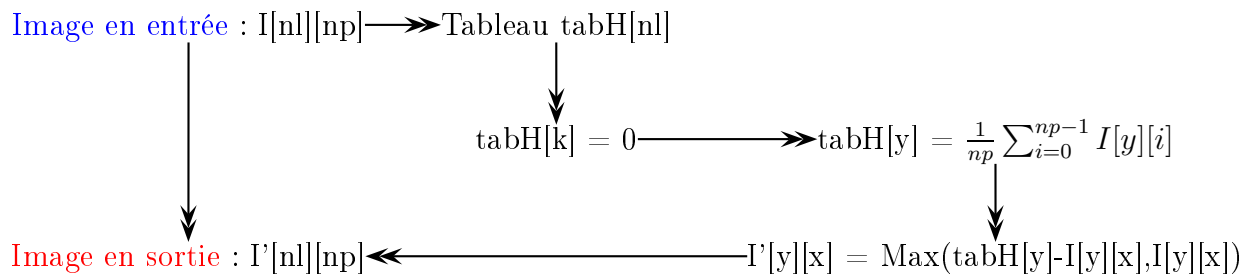


FIG. 4.13: Fréquence par rapport à la à la moyenne de Prasanta à point : ligne

Il faut noter, qu'on pouvait également émettre l'hypothèse qui, consiste à intervertir l'écriture de la fonction objectif pour notre modélisation en écrivant autrement : $Max(I[y][x] - tab[y], I[y][x])$.

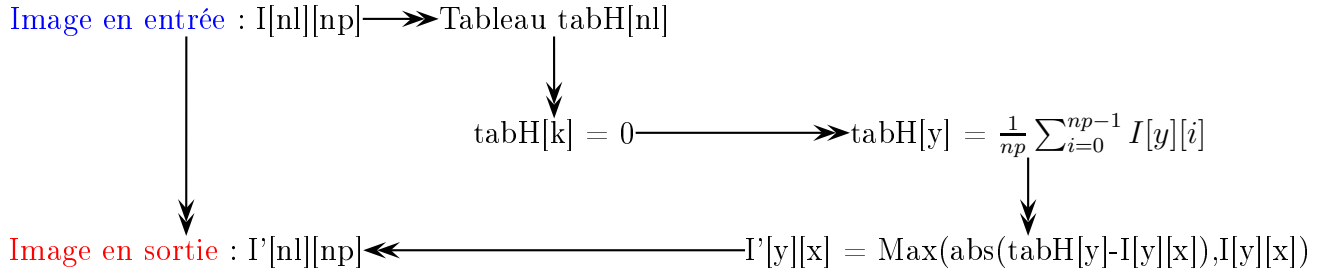


FIG. 4.14: Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point majoritaire : ligne

De Prasanta à point majoritaire : ligne

Ce cas généralise celui évoqué dans le dernier paragraphe, modélisé par l'équation (4.7).

Dans ce cas, en sortie, tout pixel d'une ligne y quelconque aura pour valeur radiométrique la valeur maximale de la valeur absolue de la différence de $tabH[y] - I[y][x]$ et $I[y][x]$, c'est à dire $Max(abs(tabH[y] - I[y][x]), I[y][x])$. Ces différentes valeurs sont données par l'équation (4.8).

$$I'[y][x] = Max(abs(tabH[y] - I[y][x]), I[y][x]) \quad (4.8)$$

Ainsi, le modèle sera régi par le schéma de la figure FIG.4.14.

4.2.6 Fréquences de l'image : verticalement

L'idée consiste à construire un tableau à une dimension **tabV** ayant le même nombre d'éléments que le nombre de colonnes de l'image en entrée. Ensuite, nous mettons dans chaque composante du tableau la moyenne correspondante à la FFT de colonne candidate.

Nous nous limitons aux cinq sous-cas les plus fréquents. À ce propos, nous obtenons les différents schémas/modèles par simple transposition. Ainsi donc, les différents modèles sous jacent sont récapitulés par leurs équations dans le tableau TAB. 4.9.

Types	Équations	Figures
En colonne	$I'[y][x] = tabV[x]$	4.15
De Prasanta : colonne	$I'[y][x] = abs(tabV[x] - I[y][x])$	4.16
Locale de Prasanta : colonne	$I'[y][x] = Max(tabV[x] - I[y][x], 0)$	4.17
De Prasanta à point : colonne	$I'[y][x] = Max(tabV[x] - I[y][x], I[y][x])$	4.18
De Prasanta à point majoritaire : colonne	$I'[y][x] = Max(abs(tabV[x] - I[y][x]), I[y][x])$	4.19

TAB. 4.9: Modèles verticaux obtenus par transposition

En outre, les différents schémas résultants des différents modèles (cf. TAB. 4.9) sont donnés par les figures FIG 4.15 à FIG. 4.19.

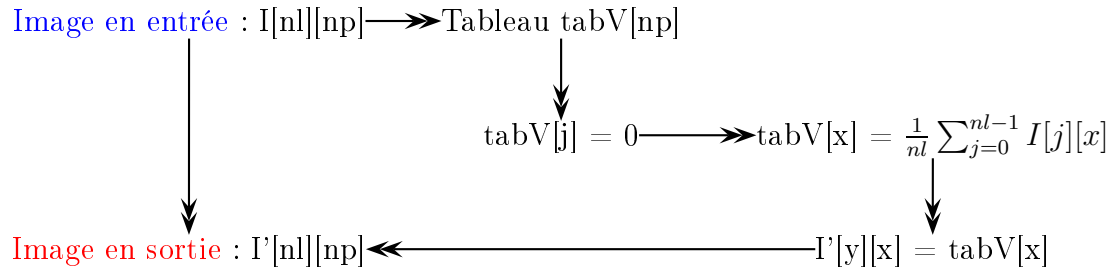


FIG. 4.15: Fréquence de l'image en colonne

L'image en sortie (FIG. 4.15) dégagera la tendance verticale globale. Tous les pixels d'une colonne x quelconque auront la même valeur radiométrique que $\text{tabV}[x]$.

Pour mettre en relief la corrélation suivant un pixel courant de la colonne (FIG. 4.16), la distance de Prasanta par rapport à la moyenne de la colonne courante est utilisée.

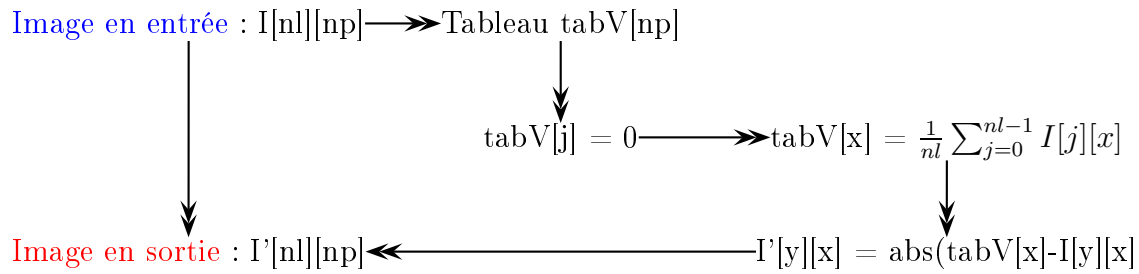


FIG. 4.16: Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta : colonne

Dans ce cas là, tout pixel d'une colonne x aura pour valeur radiométrique la valeur absolue de la différence de $\text{tabV}[x]$ et $I[y][x]$.

Un raisonnement similaire nous fournira FIG. 4.17, FIG. 4.18 & FIG. 4.19.

4.2.7 Conclusion

La transformée de Fourier est un outil indispensable du traitement du signal. Elle permet d'analyser et de filtrer des signaux dont l'expression temporelle, obtenue par échantillonnage, est en tant que telle inexploitable.

Les outils électroniques ont permis de mettre en avant ces formules mathématiques, grâce notamment à Cooley et Tukey. Ils ont donné naissance à l'algorithme de calcul FFT. D'autres algorithmes existent (Winograd, Sande)[67].

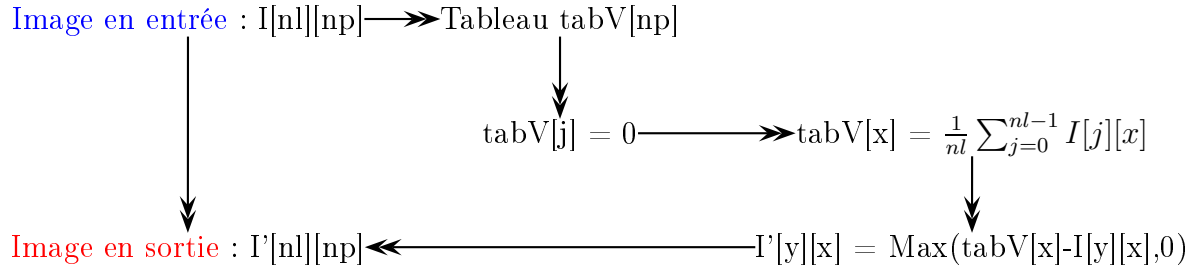


FIG. 4.17: Fréquence par rapport à la moyenne locale de Prasanta : colonne

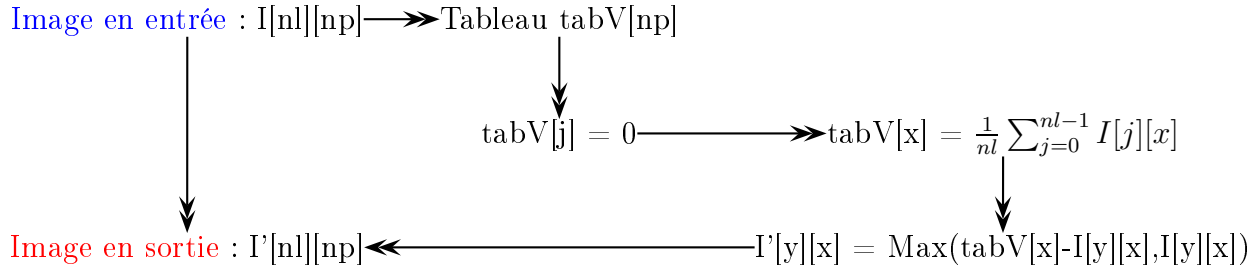


FIG. 4.18: Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point : colonne

4.3 Test sur des données de Tibesti

Dans un but de validation de techniques de détection, il est indispensable d'évaluer les codages proposés pour voir leurs comportements. L'objectif est de montrer, à partir de jeu de données disponibles le lien existant entre la reconstitution temporelle et l'évolution de relief via l'estimation des fréquences.

Dans un premier temps, on exhibe l'évolution du relief à partir d'une unique scène via les profils. Dans un deuxième temps, on présentera l'évolution de deux scènes d'une même zone prise en des dates distinctes, y compris aussi le changement qu'il y a eu entre ces deux images et sa FFT. Nous terminons notre ébauche d'estimation en donnant un récapitulatif du deuxième point, et ce avec un prétraitement au préalable.

4.3.1 Mesure de fréquences du relief

À travers cette mesure fréquentielle, et dans un souci de clarté, nous reproduisons l'évolution du relief. Elle repose sur une unique scène, afin de mettre en évidence le changement spatial et temporel attendus. Un schéma simpliste de la procédure nous menant au résultat est donné à titre illustratif par la figure FIG. 4.20 ci-dessous.

La figure FIG. 4.21 donne une représentation fréquentielle d'une ligne de la FFT de la

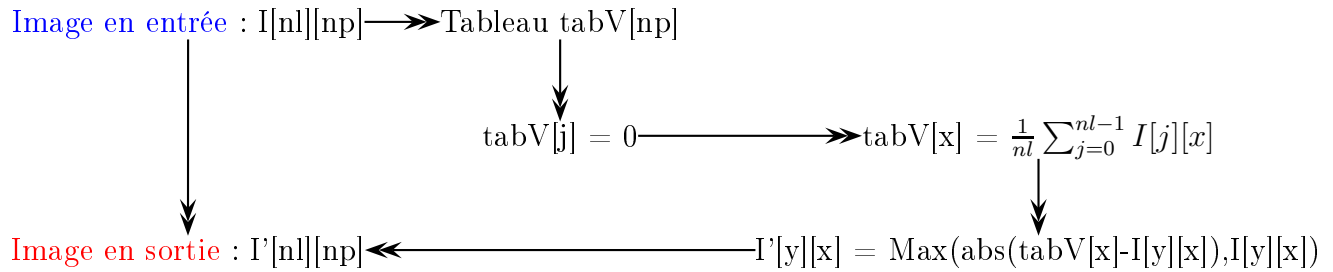


FIG. 4.19: Fréquence % à la moyenne de Prasanta à point majoritaire : colonne

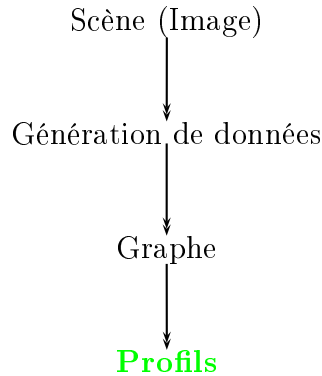


FIG. 4.20: Modèle estimant l'évolution de relief

zone de Tibesti. Les mesures fréquentielles de la ligne sont projetées sur l'axe horizontal (axe des abscisses) du domaine $[-\frac{n_p-1}{2}, \frac{n_p-1}{2}]$, où n_p est la dimension de la ligne de l'image en entrée. Le graphe obtenu est bien la représentation d'une fonction paire, symétrique par rapport à l'origine, ce qui confirme bien le modèle établi par le schéma de la figure FIG. 4.9, page 85 du présent document.

Certes, la présence des cordons de dunes n'est pas si évidente que ça. Dans cette condition, il est très difficile de soutirer quoi que ce soit de cette représentation. Cependant, par certains endroits, nous voyons apparaître des bosses. Ces bosses sont là pour exprimer quelques choses que nous ignorons sa signification pour le moment. En outre, à l'origine du repère, la valeur de la FFT est au point bas, tandis qu'à l'extrémité elle est au point haut. Cela peut s'expliquer par la construction des valeurs fréquentielles de la FFT. En fait, ces valeurs constituent une suite décroissante par morceau à partir de l'origine.

Ainsi, nous continuons à explorer d'autres pistes en faisant varier la méthode de détection de changement. Dans un premier temps, en nous appuyant simultanément sur les deux scènes distinctes. D'où la section qui suit en 4.3.2.

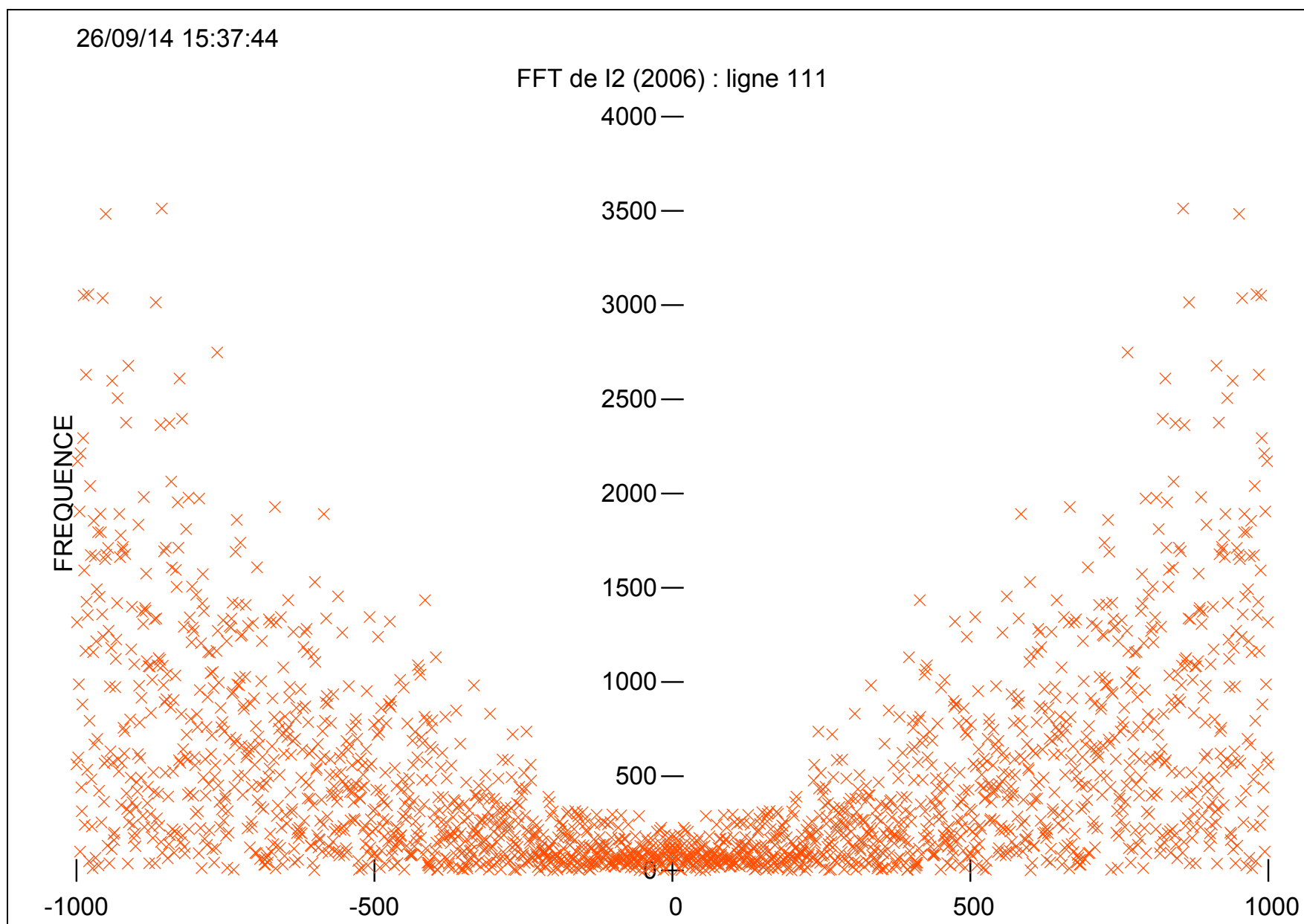


FIG. 4.21: Fréquences des images du Tibesti

4.3.2 Modélisation de l'évolution du relief par rapport à deux scènes

On dispose de deux images I_1 et I_2 acquises à deux dates différentes d'une même zone, de même dimension et superposables.

4.3.2.1 Cas de la Comparaison directe

Nous cherchons à mettre en avant, le changement en confrontant les deux scènes. Dans ce cas, nous générons les données graphiques correspondantes aux scènes ainsi que celles relatives à une comparaison directe mais aussi celle liée à la FFT de la différence. Un schéma simpliste de la procédure nous menant au résultat est donné à titre illustratif par la figure FIG. 4.22 ci-dessous.

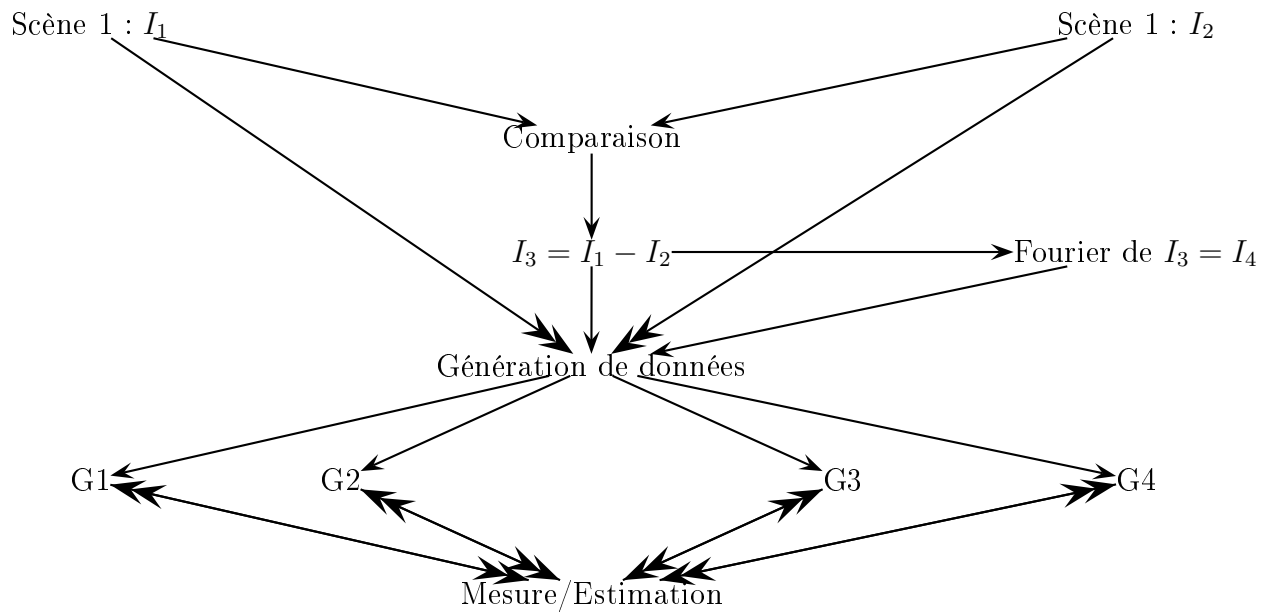


FIG. 4.22: Modèle mesurant l'évolution de deux scènes avec un prétraitement

La figure FIG. 4.23 donne diverses représentations d'une ligne de la zone de Tibesti. En explorant de gauche vers la droite et du haut vers le bas, les deux premiers graphes représentent les deux scènes sans aucun traitement au préalable. Le troisième graphe donne une représentation de la différence et le dernier celui de la FFT du troisième graphe.

Des éventuels changements peuvent apparaître dans le troisième graphe de la différence. Un zoom sur un domaine d'intérêt permet de préciser davantage la détection, cependant, elle demeure grossière vu que le speckle n'a pas été atténué avant la comparaison directe.

Ainsi, nous continuons à explorer une nouvelle technique "comparaison directe combinée à un prétraitement" dans les lignes qui suivent.

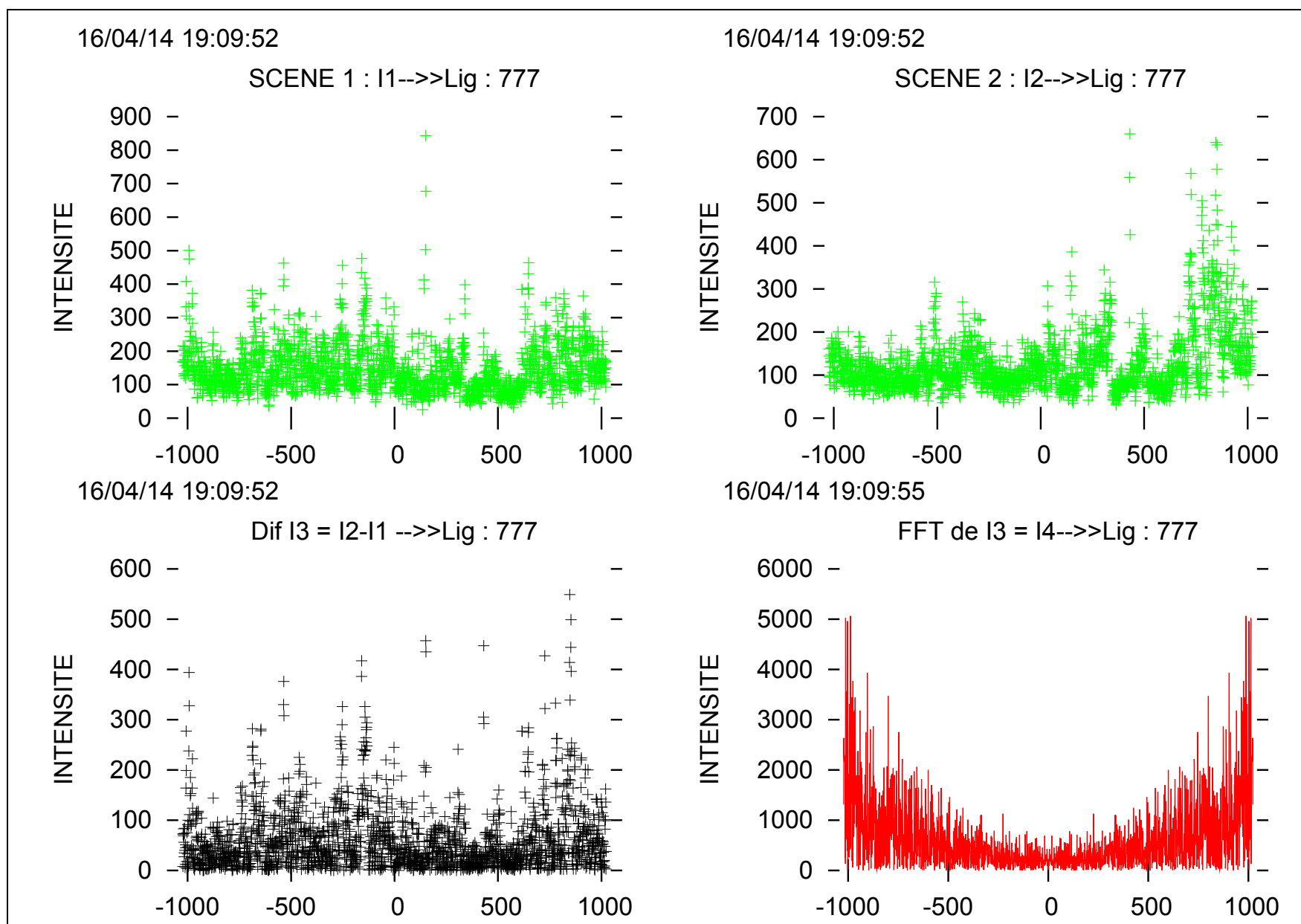


FIG. 4.23: Mesure de l'évolution de deux scènes avec un prétraitement

4.3.2.2 Comparaison directe combinée à un prétraitement

Nous souhaitons mettre en évidence le changement intervenu dans la zone d'étude en cherchant à atténuer les phénomènes de speckle et des distorsions géométriques inhérentes aux images satellites. D'une part, nous récapitulons le cas évoqué dans la figure FIG. 4.22 et d'autre part, nous générons les données graphiques correspondantes aux prétraitements voulus. Un schéma de la procédure menant au résultat est donné à titre illustratif par la figure FIG. 4.24 ci-dessous.

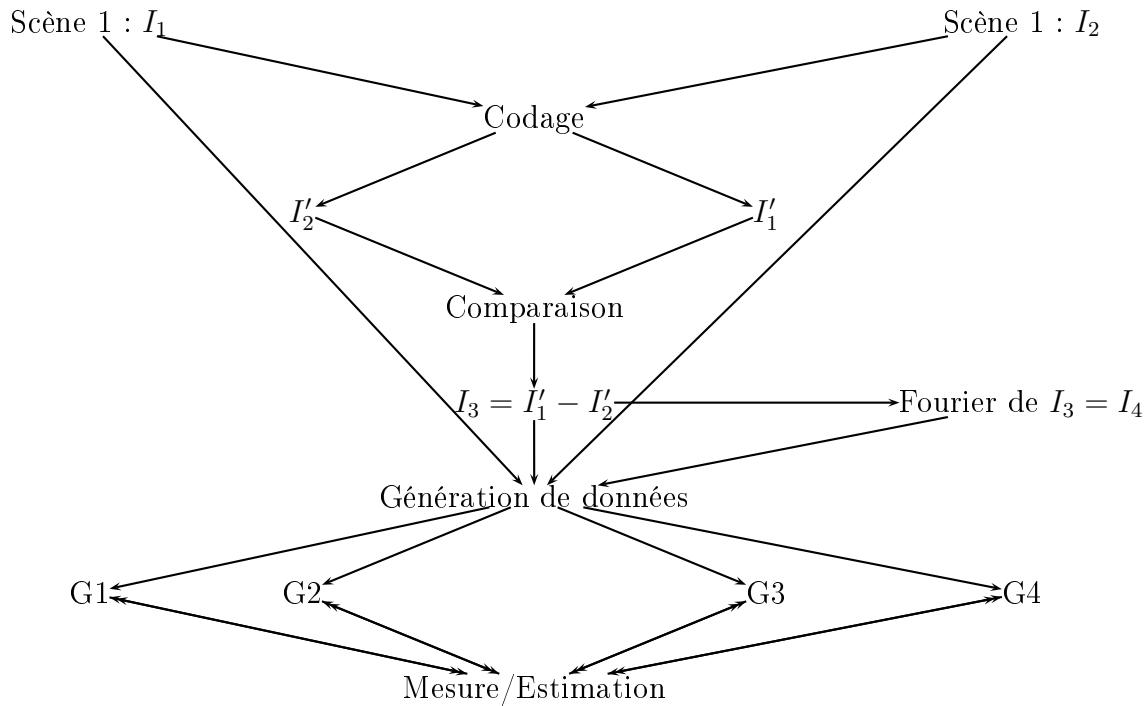


FIG. 4.24: Modèle calculant l'évolution de scènes avant et après prétraitement

La figure FIG. 4.25 donne huit représentations d'une ligne de la zone de Tibesti. En explorant de gauche vers la droite et du haut vers le bas, les deux premiers graphes représentent les deux scènes (I_1 & I_2) sans aucun traitement au préalable. Le troisième graphe donne une représentation de la comparaison directe ($I_3 = I_1 - I_2$), le quatrième celui du quotient ($I_4 = \frac{I_1}{I_2}$), le cinquième (I_5) et sixième (I_6) correspondent à un prétraitement circulaire de I_3 (respectivement I_4) avec rayon de voisinage (10), le septième ($I_7 = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$) et le dernier (I_8) correspond à la FFT du I_3 .

Des changements notables sont à considérer dans (I_5) & (I_6) contrairement aux (I_3) et (I_4). Ainsi, dans certains cas, les prétraitements permettent de s'affranchir des speckles et de distorsions géométriques. Cependant, un zoom avant sur un domaine d'intérêt permet de préciser davantage la détection que celle évoquée dans la section ci-dessus.

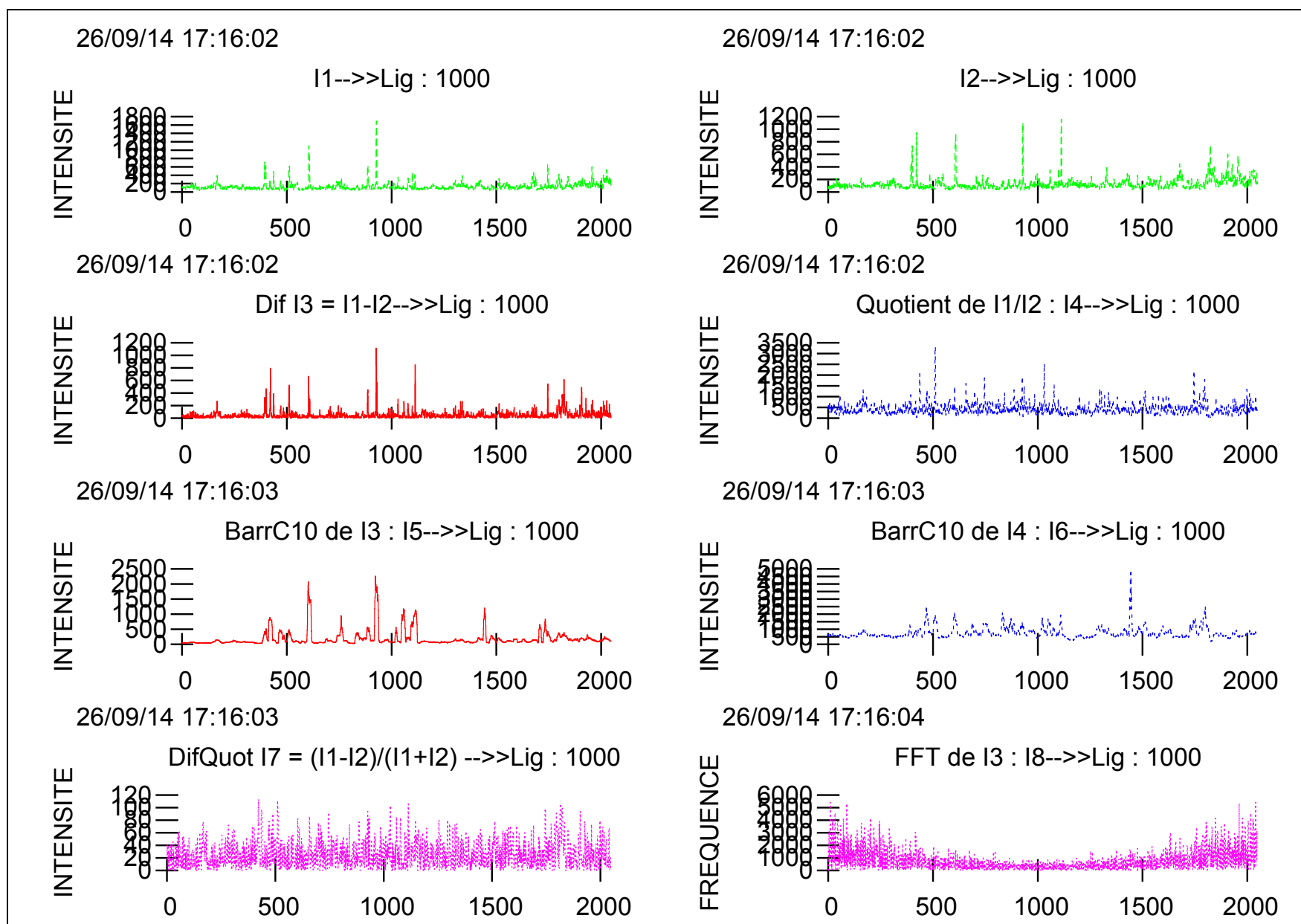


FIG. 4.25: Mesure de l'évolution de scènes avant et après prétraitement

4.3.3 Visualisation du profil

Cette section donne les éléments de base nécessaires nous permettant de générer l'allure de profils à travers les résultats de codage. Cette génération de profils se fait de façon automatique, une fois les données graphiques fournies en entrée.

On se donne deux définitions simplistes afin de faciliter la lecture de cette section. Il s'agit des concepts de profil d'intensité et profil d'une image.

Profil d'intensité : Le profil d'intensité d'une ligne en 1D, est représenté par des signaux fournis par la cible imagée par le capteur de l'antenne. Il est représenté par une courbe.

Profil d'une image : On appelle profil d'intensité d'une image, c'est la représentation complète de l'image par des graphes représentant les signaux résultants de l'acquisition. En d'autres termes, le profil d'une image est la généralisation de profil d'intensité d'une ligne.

Pendant l'acquisition de la scène par un capteur d'une plate-forme, l'image est stockée dans un fichier sous un format accessible. Le capteur peut être matriciel ou à défilement. La représentation obtenue donne l'allure du graphe résultant de l'acquisition.

Après une brève introduction aux notions de profils, nous comptons dans cette section, à générer les scènes des images en nous appuyant sur les profils de ligne. L'idée consiste dans un premier temps à évaluer le profil d'une ligne à partir du fichier d'entrée préalablement formaté, appelé données graphiques et d'un codage adéquat. Ensuite, passer à un codage assez global permettant de simuler l'image dans sa totalité.

De cette manière, on pourra observer continuellement l'évolution du relief d'une scène dans l'espace, pour n'importe quelles données graphiques. Un schéma illustratif est donné dans le tableau TAB. 4.10.

Le principe de productions de profils est relativement simple. Il peut être résumé en trois étapes. Nous donnons ici des idées directrices aux lecteurs intéressés :

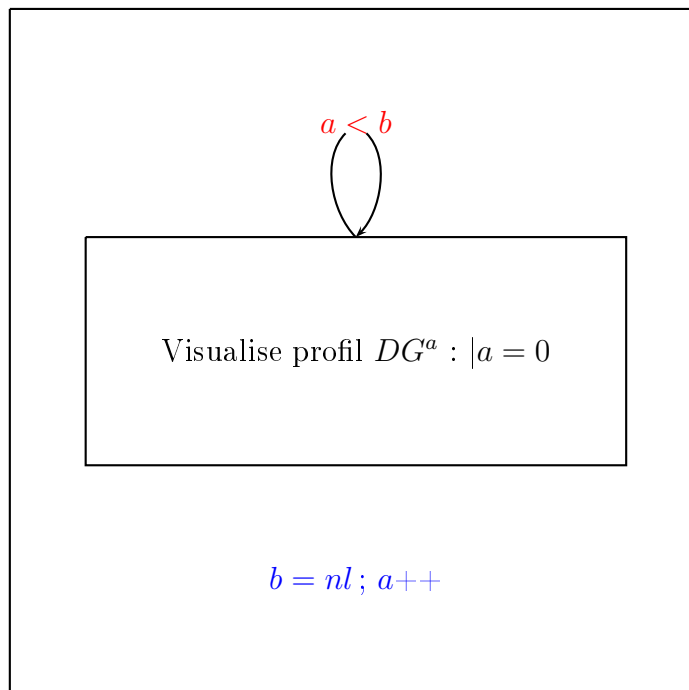
- ◇ On se donne une image I en entrée.
- ◇ Un premier codage génère les données graphiques (DG) correspondantes à I .
- ◇ Un deuxième codage prenant en entrée DG et fournit :
 - une représentation visuelle, dans le but d'une meilleure appréciation de l'évolution du relief,
 - la trace de l'acquisition du résultat dans un fichier. Cela permettra une interprétation/exploitation ultérieure des expérimentations obtenues.

L'ensemble de profils d'une image peut être obtenu. À cet effet, nous renseignons dans un premier temps la dimension verticale de l'image. Puis un compteur permettant de boucler sur l'image tant que les conditions aux limites restent vraies est également initialisé. Cette situation peut être résumée en pseudo code dans un algorithme simpliste **Algorithme 1**, page 99.

Intuitivement, nous pouvons proposer assez facilement une procédure du modèle global de la chaîne de traitement. Ce modèle synthétise tous les processus, depuis leur modélisation jusqu'à leur visualisation.

En effet, à ce stade, nous pouvons résumer la situation en quatre étapes :

À soit nous générons directement les données graphiques DG de profils de la scène,



TAB. 4.10: Mesure de profils

soit nous faisons passer l'image de la scène à travers un de nos codages, cf. Chapitre 5, avant de pouvoir générer les DG ,

soit nous soumettons nos scènes à une des techniques de comparaison directe, cf. Chapitre 2, avant génération de données de profils,

soit, après le codage du point on passe par la comparaison du point ou bien vice-versa.

4.3.4 Comparaison de fréquences de deux sites distincts

Dans cette section, on souhaite procéder à la comparaison de fréquences de Fourier de deux sites distincts. Il s'agit notamment d'un site désertique dans le Tibesti et d'un site de la forêt équatoriale¹. Dans un premier temps, nous effectuons une description visuelle de deux sites. Ensuite, nous analysons les résultats du traitement à travers les profils radiométriques.

Nous constatons, FIG.4.26 que l'image de la forêt (b) est relativement homogène par rapport à l'image radar du site désertique (a) de dimension (8392, 8888) pixels.

En effet, l'image FIG.4.26(b) renferme la mangrove, la forêt inondée et marécageuse et la forêt non inondée du bassin côtier. L'ensemble est organisé d'une façon spectaculaire. Ce qui lui confère l'homogénéité globale. Par contre, l'image FIG.4.26(a) est complexe. Cette complexité s'explique par le fait que, des fois certaines zones de la région, déjà hétérogène

¹Forêt au Gabon

Algorithm 1 : Algorithme de génération des profils

```
(*-----cette procédure consiste à donner les grandes lignes
-----pour pouvoir simuler les données graphiques-----*)
```

```
I : Image en entrée
```

```
I' : Codage (I)
```

```
DG : Donnees graphiques
```

```
DG(I) --->> génération de DG de l'image en entrée
```

```
DG(I') --->> génération de DG de l'image en sortie
```

```
b=nl --->> nombre de lignes à exhiber
```

```
a=0 --->> compteur : valeur initiale
```

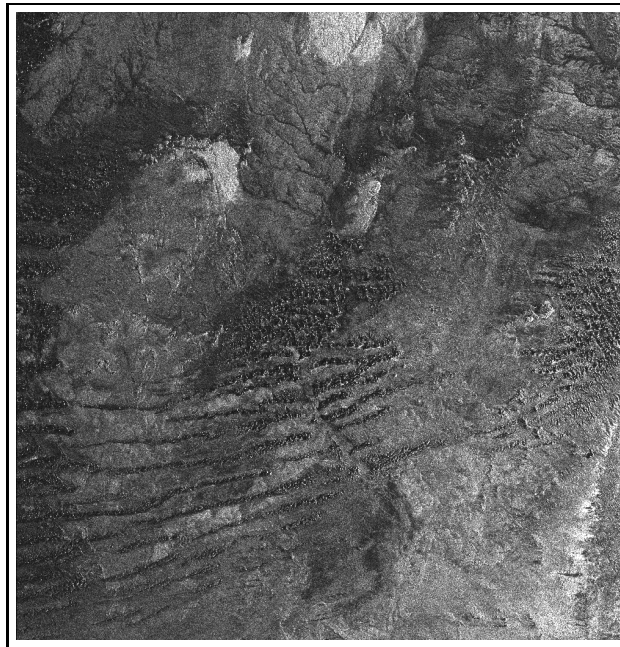
```
Tant que a < b
```

```
    visualise profil DG
```

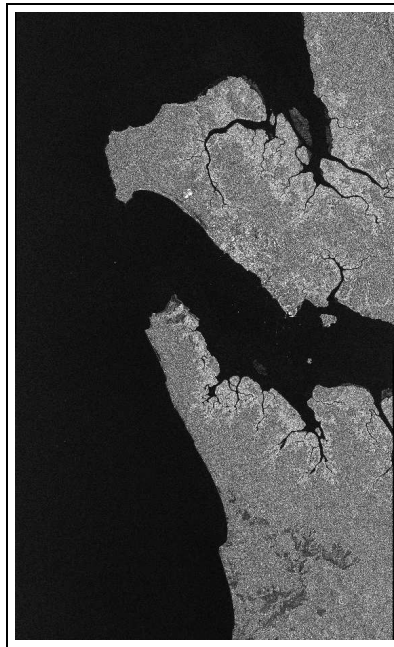
```
    a++
```

```
Fin tant que
```

```
Fin.
```



(a) Site désertique



(b) Site forestier

FIG. 4.26: Images de deux sites distincts

(sable, massifs, anciennes roches), s'imbriquaient.

Les fréquences dans le désert sont beaucoup plus élevées que celles dans la forêt, cf. FIG.4.27. Cela peut s'expliquer en partie par la présence des points brillants dans les images du désert venant des hauts de dunes et de quelques massifs granitiques ou basaltiques. D'ailleurs l'image de la forêt semble être homogène par rapport à l'image désertique.

4.4 Conclusion

Une recherche permettrait d'évaluer quantitativement et objectivement des changements intervenus dans un espace dunaire. Compte tenu des avantages des images satellitales : la répétition des données, leur vue synoptique, format numérique apte au traitement par ordinateur. Ces images deviennent une source d'information pertinente pour le suivi multitudes des changements à la surface de la Terre.

Les dunes sont quasi périodiques dans le désert. Pourtant, l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT : Fast Fourier Transform) montre qu'elles se traduisent par des groupes de fréquences variables dans les spectres. Cela s'explique en partie par l'hétérogénéité de la région du Tibesti (dunes, massifs, anciennes roches). D'où une éventuelle détection individuelle des dunes à travers les profils radiométriques reste très difficile par cette technique, voir le graphe de la figure FIG.4.27. Toutefois, il serait possible de refaire une étude avec d'autre base des fonctions telles que les ondelettes, par exemple. Cependant, ceci sort du cadre de notre étude.

La visualisation de profils est importante pour la comparaison des observations à distance à la réalité du relief, et dans la détermination ou pas de la détection de changements.

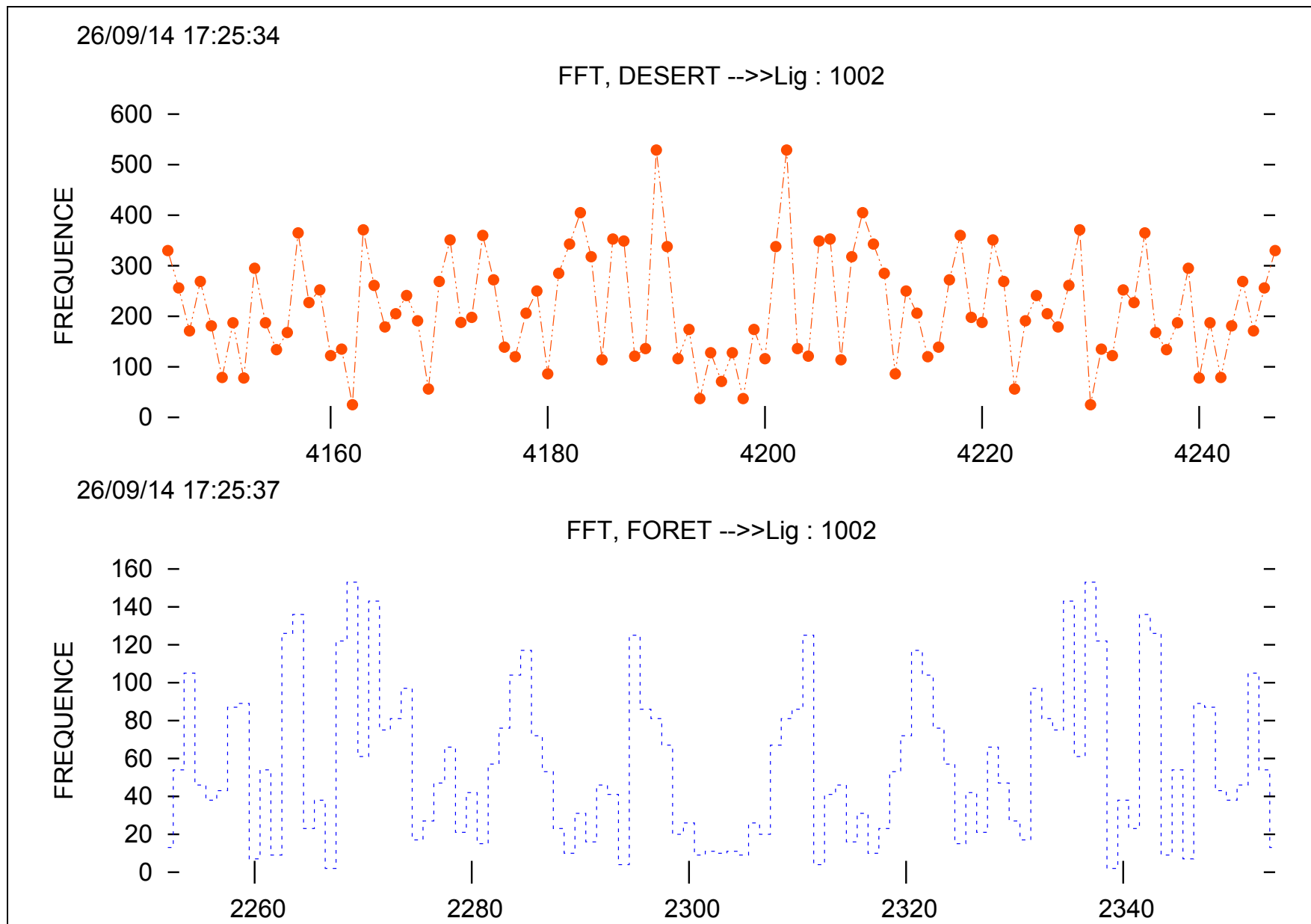


FIG. 4.27: Mesure de profils de deux scènes distinctes

Tableaux

4.1	Exemple de traitement pixel à pixel	74
4.2	Extension de TAB.4.1	74
4.3	Transformation locale vers un pixel	75
4.4	Extension de TAB. 4.3	75
4.5	Transformation en ligne	75
4.6	Extension de TAB. 4.5	76
4.7	Caractérisation de ces trois types de transformations	76
4.8	Paramètres d'images numériques [66]	81
4.9	Modèles verticaux obtenus par transposition	88
4.10	Mesure de profils	98

Figures

4.1	Construction de f_j : étage de papillon	78
4.2	Schéma complet de l'algorithme temporel de Cooley-Tukey	79
4.3	Schéma complet de l'algorithme fréquentiel de Cooley-Tukey	80
4.4	Construction simplifiée de f_i en 1D	82
4.5	Construction généralisée de f_i en 1D	82
4.6	Codage simplifié de la FFT en 1D	83
4.7	Construction simplifiée de f_{ji} en 2D	83
4.8	Construction généralisée de f_{ji} en 2D	84
4.9	Codage simplifié de la FFT en dimension 2	85
4.10	Fréquence de l'image en ligne	86
4.11	Fréquence de l'image par rapport à la moyenne de Prasanta	86
4.12	Fréquence de l'image par rapport à la moyenne locale de Prasanta	87
4.13	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point : ligne	87
4.14	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point majoritaire : ligne	88
4.15	Fréquence de l'image en colonne	89
4.16	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta : colonne	89
4.17	Fréquence par rapport à la moyenne locale de Prasanta : colonne	90
4.18	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point : colonne	90
4.19	Fréquence % à la moyenne de Prasanta à point majoritaire : colonne	91
4.20	Modèle estimant l'évolution de relief	91
4.21	Fréquences des images du Tibesti	92
4.22	Modèle mesurant l'évolution de deux scènes avec un prétraitement	93
4.23	Mesure de l'évolution de deux scènes avec un prétraitement	94
4.24	Modèle calculant l'évolution de scènes avant et après prétraitement	95
4.25	Mesure de l'évolution de scènes avant et après prétraitement	96
4.26	Images de deux sites distincts	99
4.27	Mesure de profils de deux scènes distinctes	101

Détection des dunes

Afin d'utiliser au mieux les informations contenues dans les images satellites, il est nécessaire de pratiquer au préalable différentes étapes de prétraitements : réduction des phénomènes de speckle, corrections des distorsions géométriques & radiométriques inhérentes aux images SAR. Une fois ses étapes franchies, il nous faut alors détecter des éléments sur les images, caractéristiques de ce que nous recherchons. Une fois cela fait, nous pouvons apprécier leurs variations temporelles.

Sommaire

5.1	But	104
5.2	Seuillage	104
5.3	Méthodes utilisant la moyenne	108
5.4	Caractérisation des formes & paramètres statistiques	128
5.5	Les points brillants	131
5.6	Détection conjointe & corrélations	134
5.7	Recherche des variations de formes par "shape from..."	147
5.8	Conclusion	156

Ce chapitre est au coeur de nos travaux. Il présente quelques techniques de détection par prétraitement. Il est constitué de sept sections. Une fois l'objectif clairement défini, nous entrons dans le vif des différents codages. Ainsi, dans un premier temps, la technique du seuillage dans un contexte global des images satellites avec ses speckles et distorsions géométriques sera évoquée. Puis, suivra quatre nouvelles approches reposant sur des filtres moyens. Ensuite, nous définissons quelques autres paramètres statistiques utiles à la caractérisation des formes et à la compréhension du chapitre. Par ailleurs, une brève présentation des points brillants sera introduite afin de mettre en évidence les dunes co-détectées et les détections faites uniquement en chacune des périodes. En outre la section suivante (5.6) présentera la technique de détection conjointe & corrélation. Enfin, celle reposant sur "recherche des variations de formes par shape from shading" termine le chapitre, bien évidemment suivie d'une conclusion.

5.1 But

L'objectif principal est de caractériser le changement intervenu dans un site à partir d'images satellites SAR. À cet effet, nous proposons cinq approches de détection de changement dunaire, dont les et sont particulièrement intéressantes. Il s'agit des méthodes portant sur :

À le seuillage,

les filtres moyens :

- (a) voisinage 2D,
- (b) voisinage linéaire : barrettes directionnelles & barrette axiale,
- (c) voisinage circulaire : barrettes circulaires,

points brillants,

détection conjointe/corrélation

et variations de formes par "shape from shading"/radarclinométrie.

Les méthodes statistiques utilisées en traitement d'images sont souvent prometteuses. Cependant, toutes ces méthodes découlent principalement des calculs de probabilités et des distances mathématiques. C'est pourquoi, notre démarche reste en partie attachée aux résultats statistiques, plus exploitables pour affiner nos connaissances des objets contenus dans les images.

Les images radar des surfaces planétaires fournissent une mine d'information sur l'espace imagé. Arriver à tirer profit en cela, nécessite en amont un travail de fond. En général, ce travail, consiste, d'une part à analyser et comprendre le domaine d'étude, ensuite proposer des modèles théoriques régissant le système, puis passer à leur implémentation afin de le tester et enfin le valider.

Par ailleurs, le speckle étant un phénomène non directionnel, la quasi totalité de nos traitements sont non directionnels.

Les résultats obtenus seront discutés et comparés avec les données d'enquêtes sur le terrain, voir chapitre 6, à la page 159.

5.2 Seuillage

Pour pouvoir être exploitée, une image numérique a très souvent besoin d'être simplifiée, c'est le rôle du seuillage.

En fonction de formes recherchées (tailles de cibles, zones de couleurs particulières), le seuillage séparera les structures intéressantes des autres. La transformation consiste à donner la valeur 1 aux pixels satisfaisants une inéquation.

Le seuillage est une opération permettant de faire une segmentation (respectivement une classification) rudimentaire, à partir de l'histogramme unidimensionnel de l'image. En d'autres termes, le seuillage est un traitement consistant à faire un codage simplifié en deux blocs de niveaux de gris.

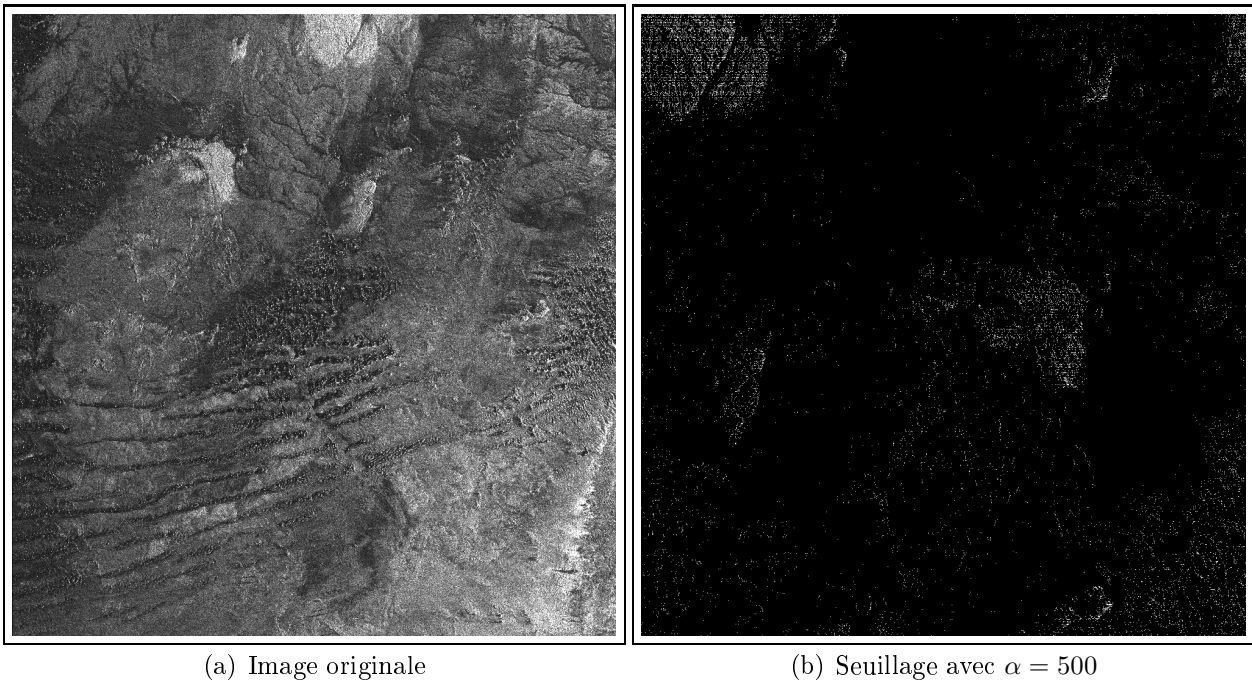


FIG. 5.1: Illustration du seuillage simple, sur l'image originale $I_1(8392, 8888)$

Soit I une image de dimension (nl, np) et α un nombre réel positif. La valeur radiométrique du pixel p de coordonnées (y, x) dans l'image I est notée $I(y, x)$. Ce qui revient à une opération de binarisation de l'image. Le traitement repose sur une valeur α désignant le seuil fixé (niveau de gris), saisi ou déterminé par un autre traitement.

Soit I' l'image binaire créée à partir de I .

$$I'(y, x) = \begin{cases} \alpha & \text{si } I(y, x) \geq \alpha \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Un exemple est celui sur la figure FIG. 5.1.

Dans certains cas, on peut pratiquer également le multi-seuillage. Il est effectué sur deux ou plusieurs valeurs de seuils. À cet effet, pour illustrer notre propos, on utilise deux valeurs de seuils α_1 et α_2 (avec $\alpha_1 \leq \alpha_2$). On parle alors de filtre passe bande.

La nouvelle valeur de tout pixel de I' est alors :

$$I'(y, x) = \begin{cases} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} & \text{si } \alpha_1 \leq I(y, x) \leq \alpha_2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le traitement paraît très élémentaire, cependant il permet d'isoler des thèmes très caractéristiques contenus dans l'image, et qui correspondent aux différentes bosses de l'histogramme.

Un exemple est celui sur la figure FIG. 5.2.

Cette méthode permet de générer des profils binaires que l'on peut ensuite comparer par des méthodes de détection de changement. Dans le cas des images radar, le seuillage sur



FIG. 5.2: Multiseuillage avec deux niveaux, sur l'image originale $I_1(8392, 8888)$

les valeurs basses, mélange les valeurs générées par les ombres dues au relief et les valeurs faibles dues au speckle. Ce qui fait que les algorithmes de détection de changement basés sur ce type de traitement génèrent beaucoup de fausses alarmes dans toute la zone étudiée.

Les grandes valeurs mélangent les fortes réflexions et les valeurs de speckle inhabituellement grandes, mais là aussi ne sont pas suffisamment répétitives pour les algorithmes classiques de comparaison, voir (c) & (d) de la figure FIG. 5.3.

Les images (zones d'intérêt) de la figure FIG. 5.3 à la figure FIG. 5.9 ont la même dimension (2048, 2048) pixels où I_1 représente l'image acquise en 2004 et I_2 celle de 2006.

Evaluations du seuillage

Une image numérique a très souvent besoin d'être simplifiée, pour pouvoir être exploitée, c'est le rôle du seuillage. Il est vrai que les méthodes de seuillage sont intéressantes pour pratiquer une segmentation à partir des histogrammes unidimensionnels ou avoir une idée globale de façon simpliste. Cependant, elles restent insuffisantes pour notre cas ; car l'image de la scène est constituée de plusieurs zones qu'il faut séparer avant de faire un traitement global sur toute l'image considérée au risque de donner une interprétation erronée. C'est ainsi qu'il a fallu penser à la mise en oeuvre des méthodes un peu plus élaborées.

La détection des points brillants par cette technique n'est pas fiable à cause de très grandes dynamiques qui rendent impossible le choix d'un seuil global. Cette expérience nous conduit à chercher des méthodes permettant de tenir compte du speckle dans les mesures faites. La partie suivante y est consacrée.

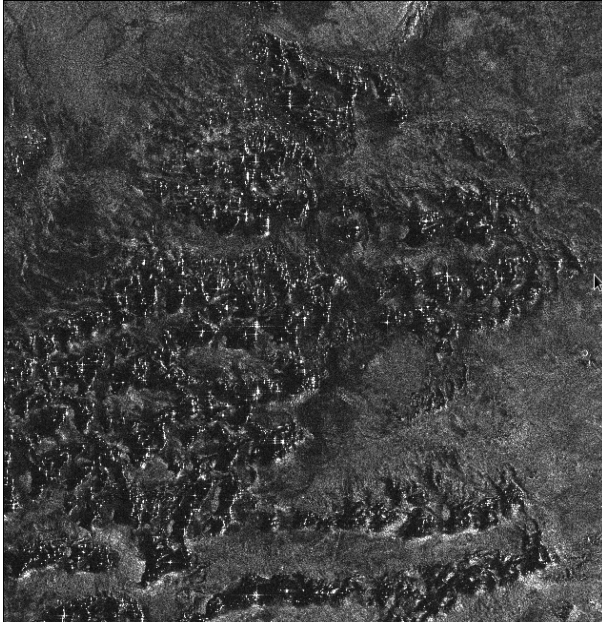
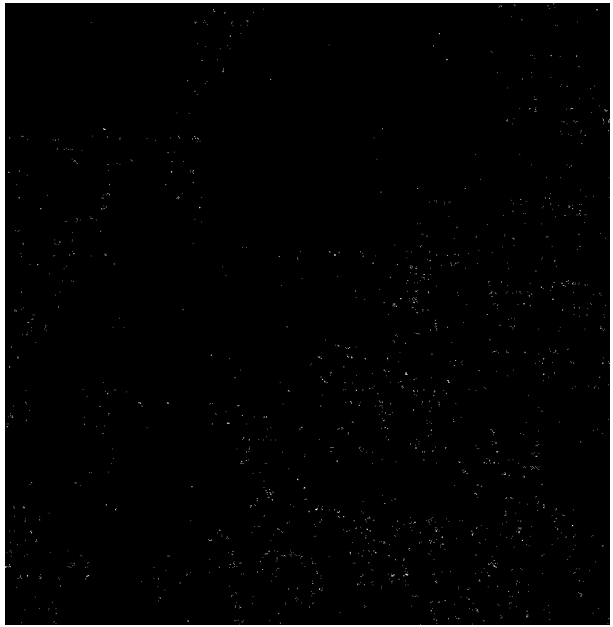
(a) Image I_1 (b) Image I_2 (c) $\overline{I_1 - I_2}$, avec $\alpha = 500$ (d) $\overline{I_1 - I_2}$, avec $\alpha_1 = 400$ & $\alpha_2 = 500$

FIG. 5.3: Comparaison des résultats : seuillage/multiseuillage

5.3 Méthodes utilisant la moyenne

Ce traitement portant sur le "**codage moyen suivant un voisinage**" permet la mise en oeuvre d'un traitement sur une zone d'action. Ce traitement est appliqué à chaque pixel de l'image en entrée, une fois le rayon du voisinage indiqué.

5.3.1 Motivation

Une première approche quand on essaye de soutirer des informations à nos images est d'éloigner les erreurs liées au speckle en utilisant une approche de calcul de valeurs représentatives via la moyenne. Comme nous nous intéressons aux dunes et aux cordons des dunes, nous cherchons à caractériser des phénomènes ayant un effet d'organisation directionnel sur les images radar. Nous allons donc dans cette partie utiliser une approche de calcul de moyenne sur des voisinages linéaires nous permettant de mettre en évidence des directions privilégiées dans l'image.

Pour le filtre moyen, nous distinguons quatre grands types de voisinage :

À global : peu util dans notre cas, car il porte sur toute l'image, cf. chapitre 4.

voisinage 2D : il peut être un carré, un rectangle ou un disque,

voisinage linéaire : directionnel, souvent matérialisé par des barrettes, et

voisinage quelconque : circulaire par exemple.

5.3.2 Voisinage 2D

Un voisinage 2D peut être un carré, un rectangle ou un disque. Pour chaque pixel initial, de l'image en entrée, le codage remplacera la valeur de ce pixel par la valeur moyenne de la "**zone d'action**" correspondante.

Un codage sur un voisinage 2D quelconque est donné dans les lignes qui suivent. Il s'agit de proposer une procédure permettant de calculer la valeur moyenne de chaque pixel p de l'image de coordonnées (x, y) sur un voisinage carré de coté n .

y/x	x-2	x-1	x	x+1	x+2
-2					
-1					
y			<i>x, y</i>		
+1					
+2					

TAB. 5.1: Voisinage 2D, n=1

La moyenne est donnée par la relation (5.1) ci-dessous.

$$\bar{I}_{2d}(x, y, n) = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=-n}^n \sum_{k'=-n}^n I[x+k][y+k'] \quad (5.1)$$

Le nombre de pixels nécessaires au calcul croît très vite avec la valeur du rayon n et il est de l'ordre de $(2 * n + 1)^2$. Les valeurs fournies par cette approche sont trop bruitées, non par le speckle mais par les pixels brillants qui conduisent à des valeurs de moyennes non représentatives et comparables au reste des types de sol présents dans l'image.

Évaluation du voisinage 2D

Le filtre moyen d'un voisinage 2D, repose sur une fenêtre rectangulaire. Il ne renseigne pas sur le type de changement. En outre, la superficie de la fenêtre croît rapidement et elle dépend du rayon n . Elle est de l'ordre de $(2n + 1)^2 * 900$ mètres carrés, car un pixel image fait 30m x 30m au sol. Par conséquent, n doit demeurer raisonnable.

Fort malheureusement, il y a aucun moyen formel pour nous guider sur le choix de n , mis à part les tests. Cependant, après plusieurs essais on constate que les valeurs de n doivent être supérieures à 60 pour obtenir des moyennes fiables. Cela est dû à la nature non gaussienne des images.

5.3.3 Utilisation d'un voisinage linéaire

Afin de caractériser des phénomènes linéaires tels que les cordons de dunes, nous avons testé une approche de calculs de moyennes sur des voisinages linéaires. Les valeurs moyennes de ces barrettes peuvent être ensuite comparées sur des directions différentes et permettent d'obtenir un critère de linéarité dont nous allons mesurer ici l'efficacité. En effet, l'approche par voisinage 2D ne donne pas satisfaction.

Ainsi, dans cette section portant sur le "**codage moyen axial**", nous avons élaboré quatre (04) types de codage de traitement axial, une fois le rayon de voisinage indiqué. Pour chaque pixel initial, de l'image considérée en entrée, notre codage remplacera la valeur de ce pixel par la valeur spécifique correspondante, générée après interrogation des valeurs d'intensités de pixels voisins.

Soit p un pixel de coordonnées (x, y) et n le rayon de voisinage. La valeur moyenne d'une composante en hauteur peut s'écrire (5.2) :

$$\bar{I}_H(x, y, n) = \frac{1}{2n + 1} \sum_{k=-n}^n I[x][y + k] \quad (5.2)$$

De façon analogue, la composante en largeur s'écrit (5.3).

$$\bar{I}_L(x, y, n) = \frac{1}{2n + 1} \sum_{k=-n}^n I[x + k][y] \quad (5.3)$$

La valeur moyenne d'une composante en diagonale est donnée par (5.4).

$$\bar{I}_D(x, y, n) = \frac{1}{2n + 1} \sum_{k=-n}^n I[x + k][y - k] \quad (5.4)$$

Enfin, celle de diagonale opposée est régie par (5.5).

$$\bar{I}_{Do}(x, y, n) = \frac{1}{2n + 1} \sum_{k=-n}^n I[x + k][y + k] \quad (5.5)$$

Le traitement flou axial dépend de rayon de voisinage n . Le nombre de cases candidates croît de façon linéaire. Pour chaque pixel considéré, de tout type de traitement axial, le nombre de cases candidates est identique. Il est de l'ordre de $(2n + 1)$ pour tous les quatre cas que nous avons étudiés. Pour pouvoir flouter toute l'image, le nombre de traitements croît assez vite. Il est estimé à un ordre de grandeur de " $nl * np * (2n + 1)$ " itérations.

Cependant, les problèmes des coordonnées de pixels se trouvant aux abords de l'image doivent être gérés et changent la taille de l'échantillon.

Évaluation du voisinage linéaire

Le filtre moyen d'un voisinage linéaire repose sur un axe (barrette). Il donne un début d'hypothèses sur le type de changement. La superficie de la barrette dépend de n . Elle est de l'ordre de $(2n + 1) * 900$ mètres carrés. Quatre sous cas évidents ont été évoqués dans ce type de voisinage. Cependant, deux attirent notre attention ; en l'occurrence le traitement en horizontal & vertical. Et, cela, en confirmation du balayage de la terre par le satellite, cf. chapitre 2.

En outre, il s'avère que le traitement en horizontal a tendance de mieux catégoriser (classifier) l'image en fonction de n . Cette classification est assez intéressante, dans la mesure où elle permet dans un premier temps de se faire une première idée du type de changement intervenu sur une zone. Le changement est déduit des résultats de la comparaison de deux images résultantes de la même scène.

Nous remarquons également que les voisinages linéaires (barrettes) étaient en générale plus homogènes. Elles fournissent pour des échantillons petits une information paradoxalement plus fiable que des voisinages 2D de taille beaucoup plus importante.

5.3.4 Résultat d'un voisinage 2D & 1D

Sur les deux images de dimension (2048, 2048), nous donnons quelques résultats relatifs aux quatre voisinages linéaires évoqués ci-haut. \bar{T}_a désigne l'image résultante obtenue par rapport à un codage spécifique et n le rayon du voisinage. Les différents résultats obtenus de ces divers codages sont donnés par les diverses figures ci-dessous : FIG. 5.4, FIG. 5.5, FIG. 5.6, FIG. 5.7, FIG. 5.8 & FIG. 5.9.

La figure FIG. 5.4(a) présente les résultats du codage d'un "voisinage 2D, type carré" d'une scène I_1 lorsque le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.4(b) pour $n = 15$. On constate très vite que l'image devient floue quand n commence à prendre de grandes valeurs. Vue l'immensité du territoire, on dira que c'est un défaut majeur. Puisque, on ne peut sonder la région d'étude que sur un rayon relativement petit. Cependant, pour un rayon critique, ce codage permet de mettre en évidence les points brillants se trouvant aux sommets de dunes donnant ainsi une idée sur la direction du vent.

La figure FIG. 5.5(a) présente les résultats d'un codage "voisinage 1D, type horizontal" d'une scène I_1 lorsque le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.5(b) pour $n = 15$. Pour des instances identiques, ce codage est meilleur que celui du voisinage 2D. Cela s'explique en partie par le fait que les pixels sondés par ce voisinage sont moindres que ceux du voisinage 2D. D'autre part, on pourra dire également que la construction de l'image par le satellite favorise en partie ce codage.

La figure FIG. 5.6(a) présente les résultats du codage "voisinage 1D de type vertical" d'une scène I_1 lorsque le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.6(b) pour $n = 15$. Pour des instances identiques, ce codage est moins meilleur que le précédent, c'est-à-dire "voisinage 1D, type horizontal". Une raison possible peut être due à la fabrication de l'image en sortie qui se fait dans l'orientation

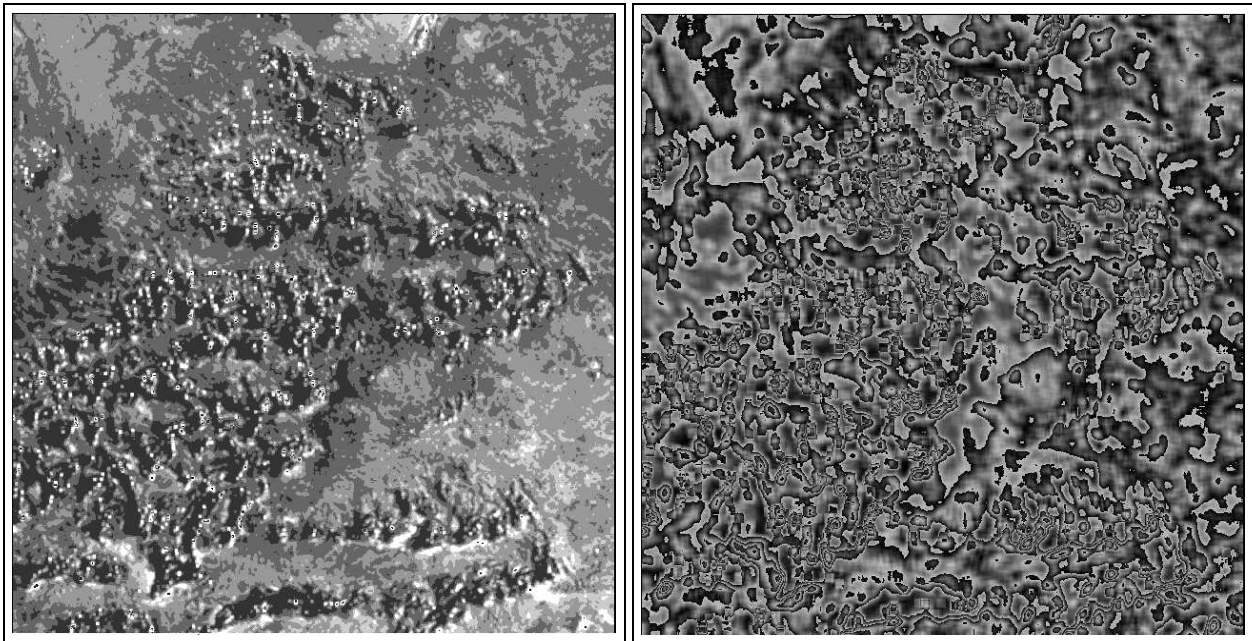
(a) Image \bar{I}_1 , avec $n = 5$ (b) Image \bar{I}_1 , avec $n = 15$

FIG. 5.4: Voisinage 2D de type carré

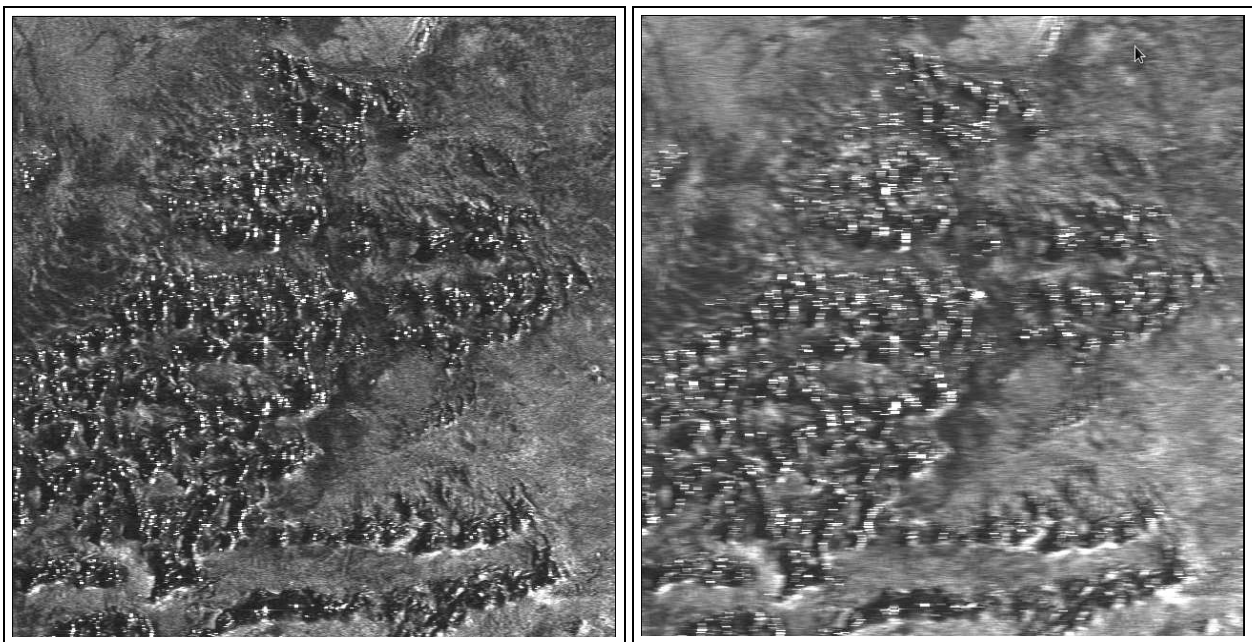
(a) Image \bar{I}_1 , avec $n = 5$ (b) Image \bar{I}_1 , avec $n = 15$

FIG. 5.5: Voisinage 1D de type horizontal

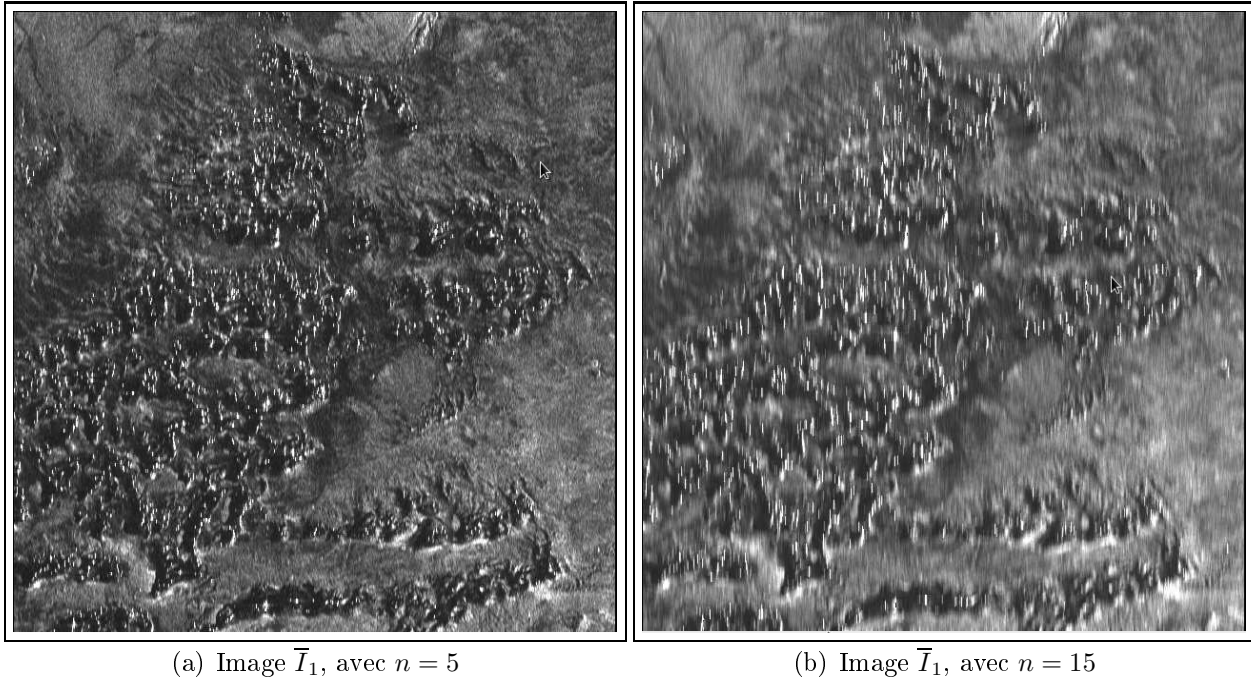


FIG. 5.6: Voisinage 1D de type vertical

nord-sud. De même, il atténue les points brillants se trouvant au dos des dunes de la zone d'étude.

La figure FIG. 5.7(a) présente les résultats du codage "voisinage 1D de type diagonal" d'une scène I_1 lorsque le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.7(b) pour $n = 15$. Nous observons que les points brillants sont mis en évidence mieux que ceux de la figure FIG. 5.6. Par contre, on constate que l'image devient floue quand n commence à croître. Cependant, pour un rayon relativement faible, ce codage permet de mettre en évidence les points brillants au même niveau que ceux de la figure FIG. 5.5.

La figure FIG. 5.8(a) présente les résultats du codage "voisinage 1D de type diagonal opposé" d'une scène I_1 lorsque le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.8(b) pour $n = 15$. Pour des instances identiques, ce codage est moins meilleur que le précédent, c'est-à-dire "voisinage 1D, type diagonal". Il atténue les points brillants se trouvant au dos des dunes quand n commence à croître. De même, l'image devient floue quand n croît.

La figure FIG. 5.9 présente la comparaison des résultats en 1D & 2D. La figure FIG. 5.9(a) présente la scène d'étude en 2004 et FIG. 5.9(b) celle de 2006. Les différences entre les scènes sont données pour un rayon de voisinage $n=5$ par FIG. 5.9(c) cas du "voisinage type horizontal" et FIG. 5.9(d) pour un "voisinage carré". Les dunes co-détectées sont nettement visibles dans les deux cas, même si celle donnée par la figure FIG. 5.9(c) est meilleure que celle de la FIG. 5.9(d). La raison est simple. Elle s'explique par le fait que le codage linéaire type horizontal est meilleur que celui d'un voisinage 2D. Par contre, la figure FIG. 5.9(d) met nettement en évidence les points brillants sur les champs de dunes que celle de la figure FIG. 5.9(c). Cela est un peu étonnant, quand on sait que le voisinage linéaire pour des instances identiques avait montré son atout par rapport au voisinage 2D.

En outre, après avoir introduit les différents types de codages moyens linéaires, nous comptons dans la section qui suit introduire de nouveaux codages. Ces codages s'appuient sur les concepts de

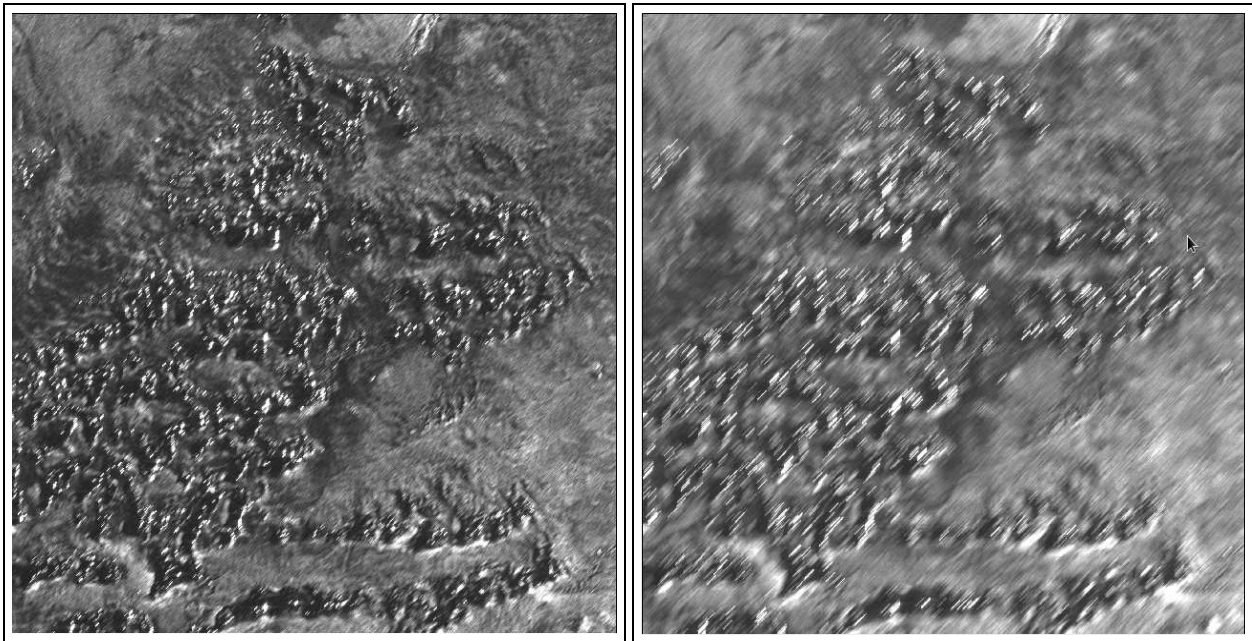
(a) Image \bar{I}_1 , avec $n = 5$ (b) Image \bar{I}_1 , avec $n = 15$

FIG. 5.7: Voisinage 1D de type diagonal

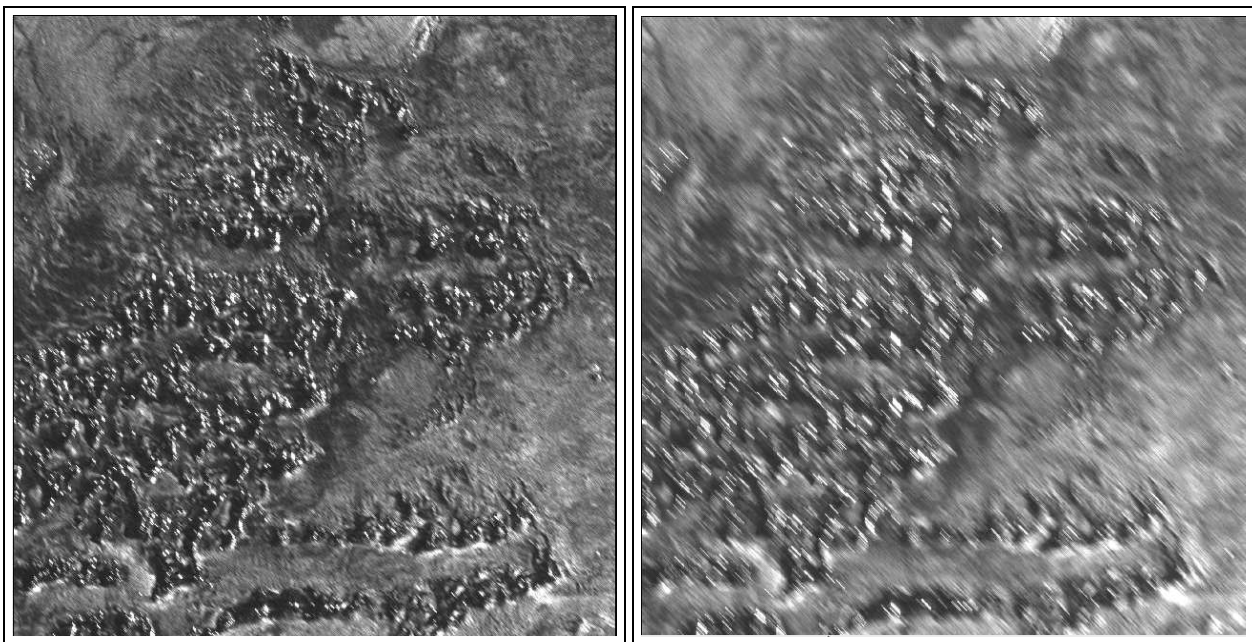
(a) Image \bar{I}_1 , avec $n = 5$ (b) Image \bar{I}_1 , avec $n = 15$

FIG. 5.8: Voisinage 1D de type diagonale opposée

(a) Image I_1 , 2004(b) Image I_2 , 2006(c) $\overline{I_1 - I_2}$, type horizontal avec $n = 5$ (d) $\overline{I_1 - I_2}$, type carré avec $n = 5$

FIG. 5.9: Comparaison des résultats en 1D & 2D

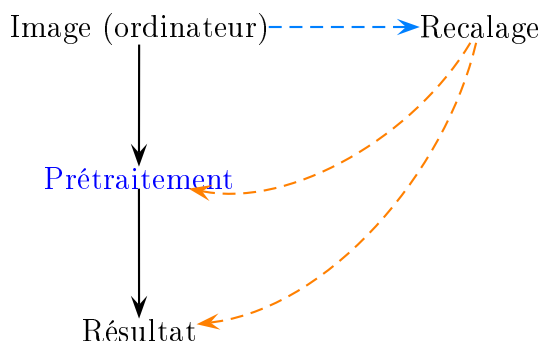


FIG. 5.10: Synoptique du modèle de traitement

barrettes. Les barrettes prennent en considération l'aspect directionnel de dunes. Ce qui ressemble un tout petit peu à la notion de rose de vent en géographie.

Par ailleurs, il faut souligner que, ces différents filtres, atténuent en partie l'effet de speckle.

5.3.5 Utilisation d'un voisinage axial : barrette

Nous définissons dans un premier temps le concept des barrettes. Ensuite, nous donnons une formalisation basée sur les quatre directions (0° , 45° , 90° et 135°) principales. Puis, suivra un codage synoptique de traitement permettant de choisir la barrette candidate idéale. Nous terminons par la comparaison de différents modes de représentation mettant en relief la détection de changement dunaire dans la zone d'étude : le Tibesti.

Dans cette étude, concernant le "**Codage des barrettes axiales**", nous essayons de proposer un traitement pour l'estimation des barrettes via un codage. Le codage détermine successivement en sortie la valeur optimale de la barrette idéale correspondante au critère, parmi les quatre (04) barrettes directionnelles candidates. Pour chaque pixel courant, que nous appellerons pixel initial p , le codage remplacera la valeur de ce pixel par la valeur moyenne de la barrette candidate correspondante, une fois le rayon de voisinage n indiqué.

j/i	i-3	i-2	i-1	i	i+1	i+2	i+3
j-3							
j-2							
j-1							
j				i,j			
j+1							
j+2							
j+3							

TAB. 5.2: Synoptique des barrettes avec $n=3$

Le schéma synoptique d'une matrice d'image, cf. TAB. 5.2, suggère que le nombre des barrettes

j/i	0	1	2	3	4	j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	19	0	14	56	18	18	19
1	11	20	30	1	14	1	11	20	30	1	14
2	59	1	23	15	15	2	59	1	31	15	15
3	17	0	40	17	71	3	17	0	40	17	71
4	21	56	47	2	87	4	21	56	47	2	87

TAB. 5.3: Calcul d'une barrette candidate, avec n=1

directionnelles passant par un pixel :

- À est fixe,
- ne dépend pas de rayon de voisinage,
- et égal à quatre (04) barrettes.

Une conséquence évidente de ce constat, est que les quatre barrettes candidates autour de (i, j) , pour $n = 1$ ont pour coordonnées :

- ◇ barrette en hauteur : $(i, j - 1)$, (i, j) , $(i, j + 1)$
- ◇ barrette en largeur : $(i - 1, j)$, (i, j) , $(i + 1, j)$
- ◇ barrette en diagonale : $(i - 1, j + 1)$, (i, j) , $(i + 1, j - 1)$,
- ◇ barrette en diagonale opposée : $(i - 1, j - 1)$, (i, j) , $(i + 1, j + 1)$

pour un n=1.

Un exemple illustratif est fourni dans le tableau TAB. 5.2 avec rayon $n = 3$ autour du pixel de coordonnées (i, j) .

En effet, en notant par **BarrH** le codage calculant la barrette verticale moyenne, **BarrL** le codage calculant la barrette moyenne en largeur, **BarrD** le codage calculant la barrette moyenne en diagonale et **BarrDop** le codage calculant la barrette moyenne en diagonale opposée. Un calcul élémentaire classique, assez simple autour du pixel courant de coordonnées $(2, 2)$ avec rayon de voisinage 1 conduit à :

- ◇ $\text{BarrH}(2, 2, 1) = 31$
- ◇ $\text{BarrL}(2, 2, 1) = 13$
- ◇ $\text{BarrD}(2, 2, 1) = 8$
- ◇ $\text{BarrDop}(2, 2, 1) = 20$

Il va sans dire que la valeur optimale maximale est 31, ce qui explique dans l'exemple du TAB. 5.3 que le pixel initial est remplacé par cette valeur dans la matrice d'image résultante de droite.

On veut reconstituer les dunes et comme ça a été montré dans le chapitre 3, seules les valeurs extrêmes permettent d'illustrer les dunes, en particulier, les valeurs fortes. La valeur optimale moyenne d'une barrette candidate a été choisie, en l'occurrence celle de la barrette verticale.

Par ailleurs, il faut aussi remarquer, que, le raisonnement restera le même si on s'est intéressé aux valeurs minimales, sauf que la plus petite sera considérée.

Un second exemple illustratif autour du pixel de coordonnées $(1, 2)$, avec $n = 2$ est donné dans le tableau TAB. 5.4.

- ◇ $\text{BarrH}(1, 2, 2) = 1/5(41+23+30+18+18)=25$
- ◇ $\text{BarrL}(1, 2, 2) = 1/5(11 + 20 + 30+1+13)=15$
- ◇ $\text{BarrD}(1, 2, 2) = 1/5(17+1+30+18+19)= 17$
- ◇ $\text{BarrDop}(1, 2, 2) = 1/5(14+56+30+15+70)= 37$

j/i	0	1	2	3	4	j/i	0	1	2	3	4
0	14	56	18	18	19	0	14	56	18	18	19
1	11	20	30	1	13	1	11	20	37	1	13
2	59	1	23	15	15	2	59	1	23	15	15
3	17	0	41	17	70	3	17	0	41	17	70
4	21	56	47	2	87	4	21	56	47	2	87

TAB. 5.4: Calcul d'une barrette candidate, avec $n=2$

Au vu des exemples illustratifs présentés dans les tableaux TAB.5.3 & TAB.5.4 et de tout ce qui a été dit dans les paragraphes précédents, on peut proposer les différents modèles pouvant formaliser les différentes barrettes. Ils sont exactement équivalents à ceux établis dans 5.3.3, page 109.

Codage du traitement de toutes les barrettes

À ce niveau, il est question de déterminer pour tout pixel de l'image originale la barrette candidate captive et adéquate. Il est donc très nécessaire de proposer un codage régissant cette contrainte, matérialisée par une routine qu'on notera par : $BarrCand(I', I, np, nl, n)$. Le codage détermine successivement chacun des valeurs de pixels de l'image en sortie après traitement.

Le fait de vouloir remplacer chaque valeur de pixel initial p par une valeur candidate, ressemble à la technique du **tramage**. À ce propos, le tramage (dithering) est une technique permettant d'améliorer les données numériques sonores et visuelles basée sur la correction des défauts par une application volontaire des bruits rendant aléatoire les distorsions.

Choix d'une barrette candidate : codage

$maxBarr$ désigne la fonction intermédiaire retournant la valeur maximale, notée V , entre deux valeurs de barrettes (β_1, β_2) passées en paramètres. Appliquée récursivement, elle nous renvoie la barrette candidate par rapport à tout pixel p de coordonnées (x, y) :

$$V = maxBarr(\beta_1, \beta_2). \quad (5.6)$$

Ainsi, nous pouvons proposer un codage **BarrCandTrait** permettant de déterminer la barrette candidate.

$$BarrCandTrait(x, y, n) = maxBarr(maxBarr(H, L), maxBarr(D, Dop)) \quad (5.7)$$

En itérant pour tout $y \in \{0, 1, 2, ..nl - 1\}$ et tout $x \in \{0, 1, 2, ..np - 1\}$, on obtiendra l'image finale souhaitée, c'est à dire :

$$\bar{I}[x][y]_n = maxBarr(maxBarr(H, L), maxBarr(D, Dop)) \quad (5.8)$$

Où $H = BarrH(x, y, n)$, $L = BarrL(x, y, n)$, $D = BarrD(x, y, n)$ et $Dop = BarrDop(x, y, n)$.

L'exploration de la Terre via une technologie moderne est devenue omniprésente. Le problème d'acquisition de données ne se pose pratiquement pas. Le problème, c'est comment parvenir à soutirer des informations fiables à partir d'images satellitales, sans que la conclusion ne soit hative. Des fois, il arrive que des informations superfétatoires importantes surgissent dans l'image qu'il faut

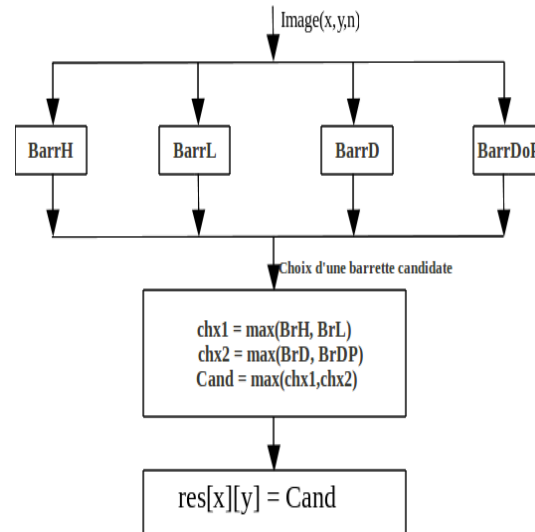


FIG. 5.11: Codage détaillé du module traitant la barrette candidate

corriger avant de passer au traitement. Idem, pour le cas des informations masquées dans l'image, qu'il faut prendre en compte avant de penser à un traitement quelconque. Eu égard à tout cela, nous avons proposé la technique sur les barrettes axiales pour atténuer davantage les phénomènes dus aux distorsions géométriques et le bruit dans l'image.

Nous donnons une représentation synoptique simplifiée à la figure FIG.5.11. Il faut souligner que cette approche a trois avantages majeurs, pour l'identification de changements intervenus dans des zones hétérogènes :

- À elle privilégie l'angle de vue pouvant minimiser la distorsion géométrique,
- elle opère un choix sur la barrette simulant le mieux la direction dominante du vent,
- elle cherche à pourvoir un angle destructeur de distorsion pour chaque pixel de l'image.

Les barrettes réelles reposent sur des directions privilégiées. Cependant, un codage se basant uniquement sur les barrettes réelles reste limité. Ces directions privilégiées ne couvrent pas totalement la rose de vents. Ce qui nous amène à introduire un nouveau concept pour prendre en compte cet aspect. Il se base sur la notion des barrettes circulaires introduite à la section 5.3.6.

Évaluation du voisinage axial adéquat

Le principal défaut dans l'interprétation visuelle ou automatique d'images SAR est du aux distorsions géométriques, et au phénomène de chatoiement, des fois appelé speckle. Très souvent, le speckle est modélisé comme un bruit aléatoire multiplicatif [68].

Ce filtre fournit la meilleure direction optimisant la valeur radiométrique parmi les quatre sous cas de voisinage linéaire. Il s'en passe également de l'orientation de l'image. Ce traitement est intéressant dans la mesure où il fournit la meilleure direction optimisante. Implicitement, il s'en suit une meilleure catégorisation de l'image que le cas linéaire pris séparément. Il atténue davantage l'effet de speckle propre à l'image radar et les phénomènes dus aux distorsions géométriques.

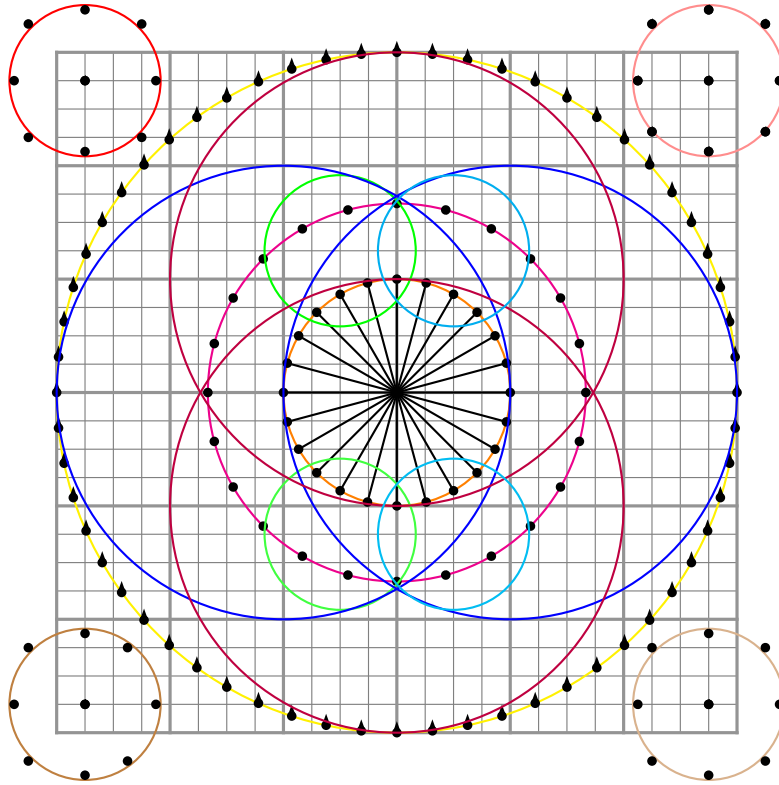


FIG. 5.12: Évolution des codages circulaires

5.3.6 Utilisation d'un voisinage circulaire en utilisant les barrettes

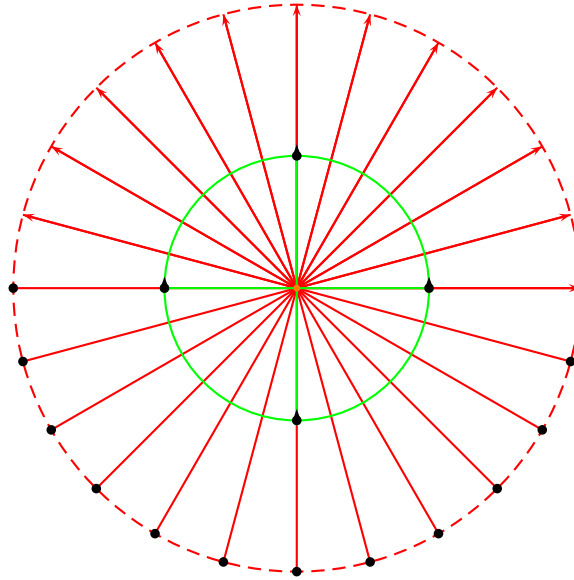
La figure FIG. 5.12 montre à peu près les différentes configurations possibles qu'on pourra rencontrer suivant le voisinage circulaire. Il dépend du rayon d'action. On voit clairement que dans la plupart des cas le voisinage circulaire est en dehors de l'espace autorisé. Des codages spécifiques sont nécessaires pour éviter de sonder des zones mémoires virtuelles pendant l'expérimentation.

Cette approche propose l'estimation des valeurs radiométriques destructrices des speckles. Elle vise ici à trouver les barrettes où les valeurs de moyenne sont estimées dans toutes les directions possibles.

Une fois le rayon du voisinage indiqué, le traitement se fera principalement en cinq (05) étapes :

- À détermination de tous les angles représentant la rose de vent,
- identification des barrettes candidates circulaires autour du pixel considéré,
- calcul de la moyenne de chaque barrette circulaire,
- choix de la barrette offrant la valeur optimale,
- enfin, la valeur optimale correspondante au tour et la direction du cercle est conservée.

Pour illustrer notre propos, on s'appuie sur la figure FIG. 5.13. Elle montre pour un pixel courant donné, le nombre de barrettes circulaires que cela peut engendrer suivant n . Pour pouvoir déterminer toutes les barrettes circulaires candidates autour d'un pixel, on se sert d'un algorithme connu dans le monde de l'infographie. Il s'agit de l'algorithme de *Michener* [69]. En effet, Michener avait proposé un algorithme optimisé pour la génération de cercle. Les calculs se limitent à des additions, soustractions et des multiplications. L'idée consiste à fixer l'origine du cercle aux coordonnées (x, y) du pixel courant p , et le rayon du cercle correspondra au rayon du voisinage spécifié.

FIG. 5.13: Barrettes circulaires avec $n = 1$ et 3

À ce niveau pratique, on définira une routine qui repose sur l'algorithme de Bresenham, non pas pour afficher le segment correspondant, mais plutôt pour déterminer la valeur moyenne des pixels supportée par la barrette. Sachant que le centre du cercle sera l'origine de chaque segment et l'extrémité sera donné par l'algorithme de Michener. Ainsi, chaque pas (i, j) sur le cercle, permet de déterminer la valeur moyenne de la barrette représentée par le segment d'origine (x, y) et d'extrémité (i, j) à travers l'algorithme de Bresenham.

Une fois toutes les valeurs moyennes calculées, nous gardons le maximum et le mettons en tant que valeur de pixel dans une nouvelle image.

Afin de proposer un codage adéquat des fonctions, on convient de désigner les termes suivants par :

- À x_0, y_0 : abscisse et ordonnée du point origine,
- x_1, y_1 : abscisse et ordonnée du point extrémité,
- max : valeur optimale à chaque tour du cercle, et
- $ValBarr$: valeur moyenne d'une barrette courante.

En se servant, intelligemment, de la fonction $maxBarr(max, ValBarr)$ de l'équation (5.6), page 117, on pourra déterminer, de façon précise, la valeur optimale à chaque tour du cercle.

Calcul de la valeur moyenne d'une barrette

Le calcul des barrettes prend beaucoup de temps, car de nombreux calculs sont nécessaires dès que le voisinage grandit. À titre d'illustration, quand on lance une expérimentation sur des images radar de dimensions importantes, c'est-à-dire de l'ordre (8000, 8000), il va falloir attendre plus de 7 jours pour espérer voir un résultat. Et ce, pour un rayon de voisinage raisonnable ($n = 10$). Ce qui nous a conduit à penser à une nouvelle approche plus économe en temps de calculs.

L'idée motrice de notre nouvelle approche consiste donc à faire en sorte que les coordonnées circulaires pour un rayon donné ne soient calculées qu'une fois. Afin de lever tout doute sur la cause de la durée de calcul de cette approche, nous avons utilisé un *profileur*. Celui-ci permet de tracer très précisément des actions du programme et à confirmer que le temps est perdu majoritairement dans la détermination du voisinage du calcul.

Formalisation de la méthode

Dans un premier temps, on calcule les coordonnées circulaires et nous nous mettons en oeuvre un codage qui stocke ces coordonnées sur deux tableaux.

Dans un deuxième temps, on calcule les moyennes de chaque barrettes. Soit $P(x, y)$ un pixel désignant le centre du cercle et $P_i(x_{P_i}, y_{P_i})$ un pixel se trouvant sur la circonférence du cercle courant.

Pour déterminer toutes les barrettes circulaires de rayon R et de centre P , il va falloir déterminer tous les segments supportés par les vecteurs $\overrightarrow{PP_i}$. Cependant, on aura besoin de calculer la moyenne radiométrique supportée par chacun des segments $\overrightarrow{PP_i}$.

Étant donnée, l'origine de la barrette $P(x, y)$ et l'extrémité $P_i(x_{P_i}, y_{P_i})$. De cette façon, nous retompons dans le cas de la section 5.3.6 présentée à la page 120.

Évaluations du voisinage circulaire

Ce filtre généralise le cas d'un voisinage axial adéquat. En outre, le codage s'inspire en partie de concepts de rose de vent. La recherche de la valeur radiométrique optimale du pixel considéré au cours de traitement est impressionnante.

En général, il fournit une meilleure catégorisation que le cas linéaire et axial. L'atténuation de speckle est similaire à celui de filtre axial. En outre, l'affaiblissement de phénomènes dus aux distorsions géométriques est considérable.

À ce stade, les codages axial et circulaire demeurent meilleurs que les autres codages. Cependant, celui reposant sur les angles destructeurs donne une idée globale sur la direction dominante des valeurs radiométriques destructrices de distorsions géométriques et atténuatrices des speckles. Pour cela, le mode graphique/courbe est meilleur que le mode visuel.

Le traitement des barrettes circulaires avec la méthode naïve demande un temps de calcul assez conséquent. Par contre celui reposant sur la méthode innovante présente un temps d'exécution raisonnable même pour les images de grandes dimensions, ainsi qu'une occupation mémoire minimale.

Les images de la figure FIG. 5.14 à la figure FIG. 5.25 ont la même dimension (2048,2048) pixels où I_1 représente l'image acquise en 2004 et I_2 celle de 2006.

5.3.7 Résultat d'un voisinage axial & circulaire

La figure FIG. 5.14(a) présente les résultats d'un "voisinage axial" d'une scène I_1 lorsque le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.14(b) pour $n = 15$. Pour des instances identiques, ce codage est meilleur que celui du "voisinage 1D, tout type". On pourra dire également que la construction de l'image par cette approche optimise la présence des speckles. Les résultats donnés par la figure FIG. 5.14 sont bien meilleurs que ceux de la figure FIG. 5.5.

La figure FIG. 5.15(a) présente les résultats d'un "voisinage circulaire" d'une scène I_1 lorsque

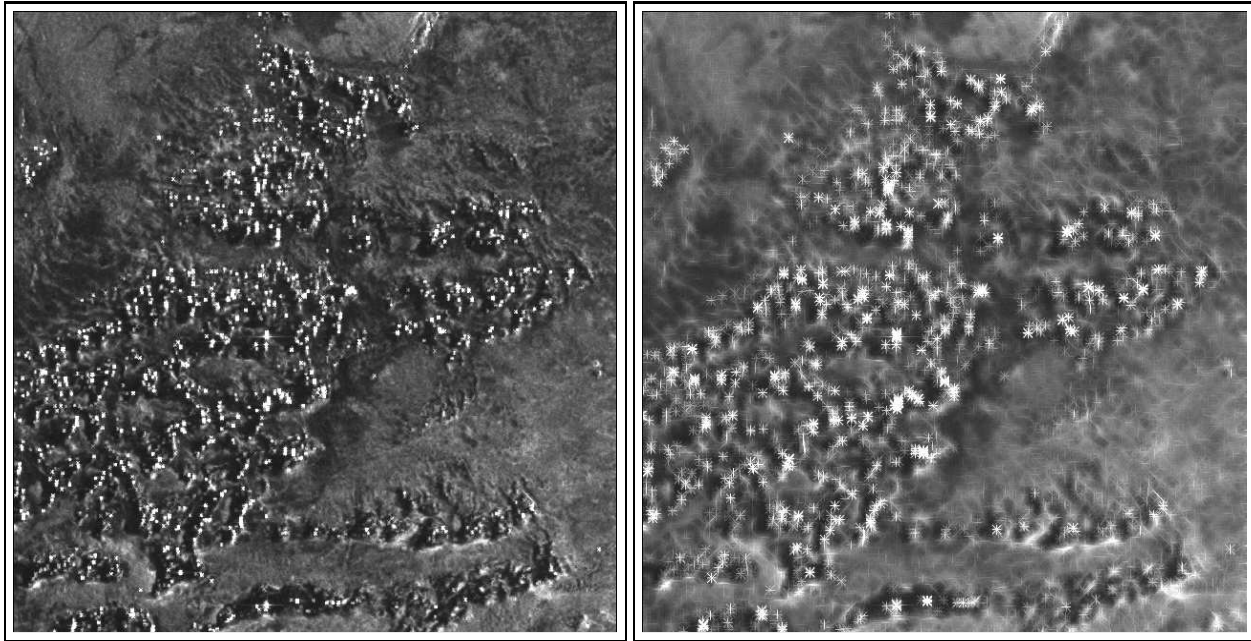
(a) Image \bar{I}_1 , avec $n = 5$ (b) Image \bar{I}_1 , avec $n = 15$

FIG. 5.14: Voisinage optimum 1D de type axial

le rayon d'action $n = 5$ et FIG. 5.15(b) pour $n = 15$. Pour des instances identiques, ce codage est meilleur que tous les autres obtenus jusqu'à maintenant. Les résultats obtenus par la figure FIG. 5.15 s'expliquent simplement par le fait que cette approche offre plus de choix en terme de valeurs radiométriques optimales.

La figure FIG. 5.16 présente la comparaison des résultats d'un voisinage "axial" & circulaire avec la même instance du voisinage $n = 5$. La figure FIG. 5.16(a) présente la scène d'étude en 2004 et FIG. 5.16(b) celle de 2006. La figure FIG. 5.16(c) illustre les résultats d'un voisinage axial et FIG. 5.16(d) ceux de type circulaire avec la même instance n . Les résultats obtenus en FIG. 5.16(d) sont relativement meilleurs que ceux en FIG. 5.16(b). Cela confirme ce qui a été dit ci-haut, sur un éventuel avantage du codage "circulaire" sur le codage "axial".

Pour finir avec la partie des résultats portant sur les voisinages 1D, nous donnons deux figures mettant en relief les angles destructeurs de distorsions géométriques, cf. FIG. 5.17 & FIG. 5.18.

La figure FIG. 5.17 présente les résultats des angles destructeurs de distorsions géométriques d'un voisinage "axial" & "circulaire" d'une même scène I_1 acquise en 2004 avec un rayon de voisinage identique $n = 5$. La figure FIG. 5.17(a) illustre les résultats d'un voisinage axial et FIG. 5.17(b) ceux du voisinage circulaire. On note que les deux figures sont pratiquement semblables.

La figure FIG. 5.18 présente la comparaison des résultats des angles destructeurs de distorsions géométriques en 1D (type axial) et 2D (circulaire). La figure FIG. 5.18(a) présente la scène d'étude en 2004 et FIG. 5.18(b) celle de 2006. La figure FIG. 5.18(c) illustre les résultats d'un voisinage axial avec un rayon de voisinage $n = 5$ et FIG. 5.18(d) ceux de type circulaire avec la même instance n . À première vue, on remarque que les résultats obtenus pendant ce test sont quasiment identiques pour $n = 5$. Donc, nous pouvons dire que la direction du vent n'est pas fonction du codage envisagé. Ce qui semble être logique.

Toutefois, en appliquant les techniques des barrettes on arrive à distinguer les vallées des dunes

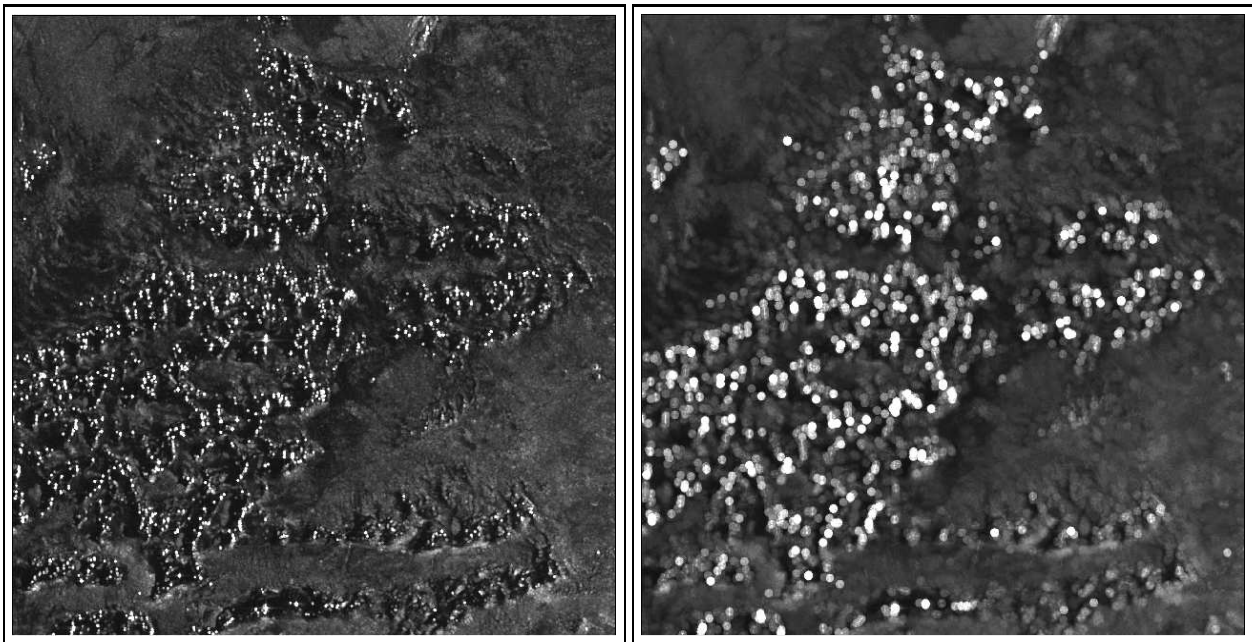
(a) Image \bar{I}_1 , avec $n = 5$ (b) Image \bar{I}_1 , avec $n = 15$

FIG. 5.15: Voisinage optimum de type circulaire

de sable. Les dunes penchent suivant la direction du vent qui est supposée stationnaire. Cette hypothèse est illustrée par la figure FIG.5.19.

Nos travaux montrent que pour des zones dunaires la direction du vent reste quasi-stationnaire par endroit. Ainsi, la FIG.5.19 illustre qu'à plus de 68.33%, le vent reste dans la direction Nord → Sud. À 25%, dans la direction Nord-Est → Sud-Ouest, 6.66% dans la direction Nord-Ouest → Sud-Est et rien d'autre. D'une part, elle confirme les résultats des études menées sur le terrain et d'autre part, valide nos hypothèses et intuitions via les techniques mises en oeuvre.

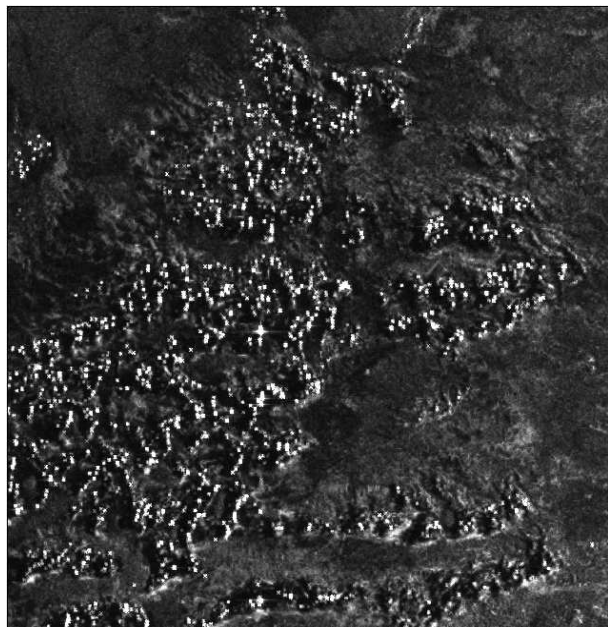
(a) Image I_1 (b) Image I_2 (c) $\overline{I_1 - I_2}$, type axial avec $n = 5$ (d) $\overline{I_1 - I_2}$, type circulaire avec $n = 5$

FIG. 5.16: Comparaison des résultats axial & circulaire

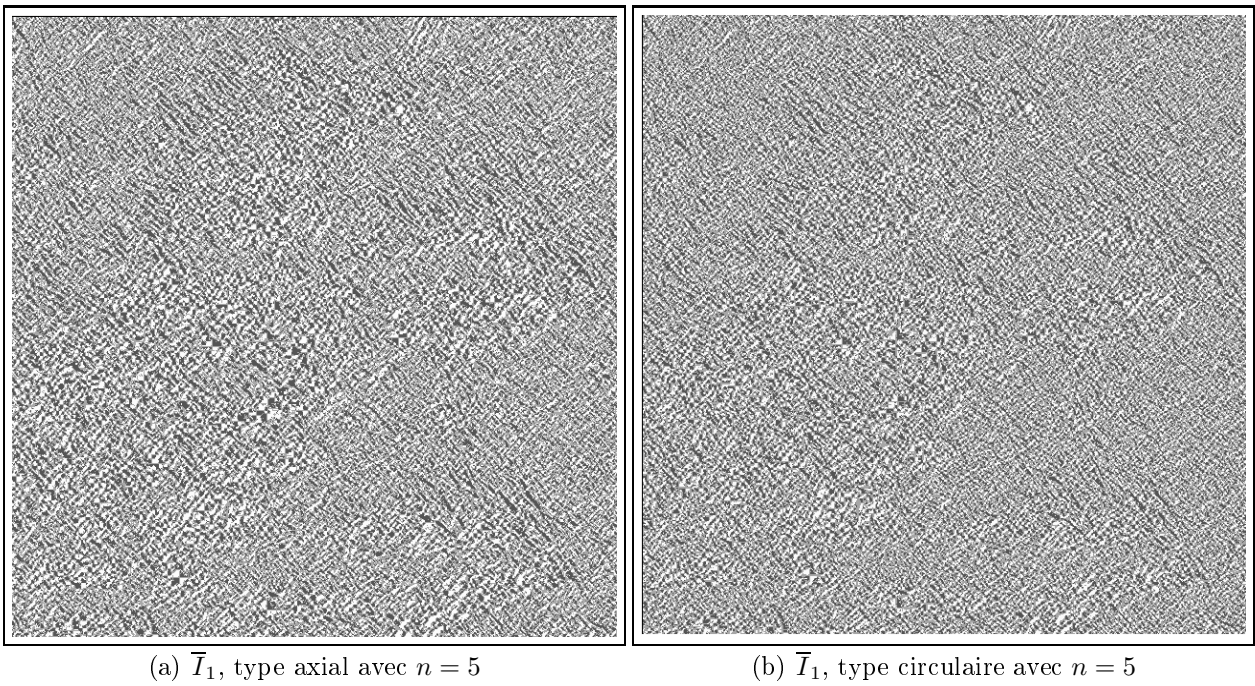


FIG. 5.17: Angles destructeurs de distorsions géométriques

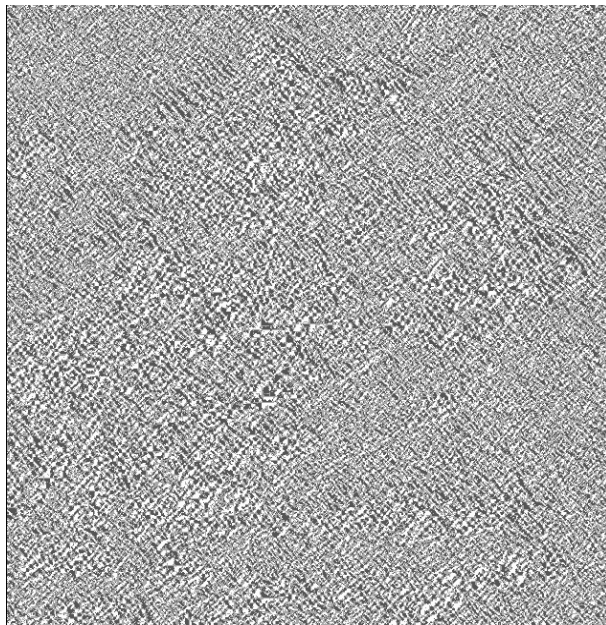
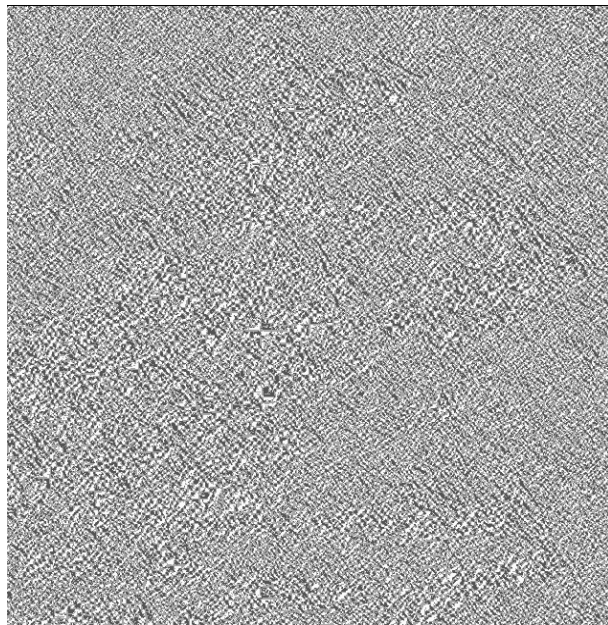
(a) Image I_1 (b) Image I_2 (c) $\overline{I_1 - I_2}$, type axial avec $n = 5$ (d) $\overline{I_1 - I_2}$, type circulaire avec $n = 5$

FIG. 5.18: Comparaison d'angles destructeurs de distorsions axial & circulaire

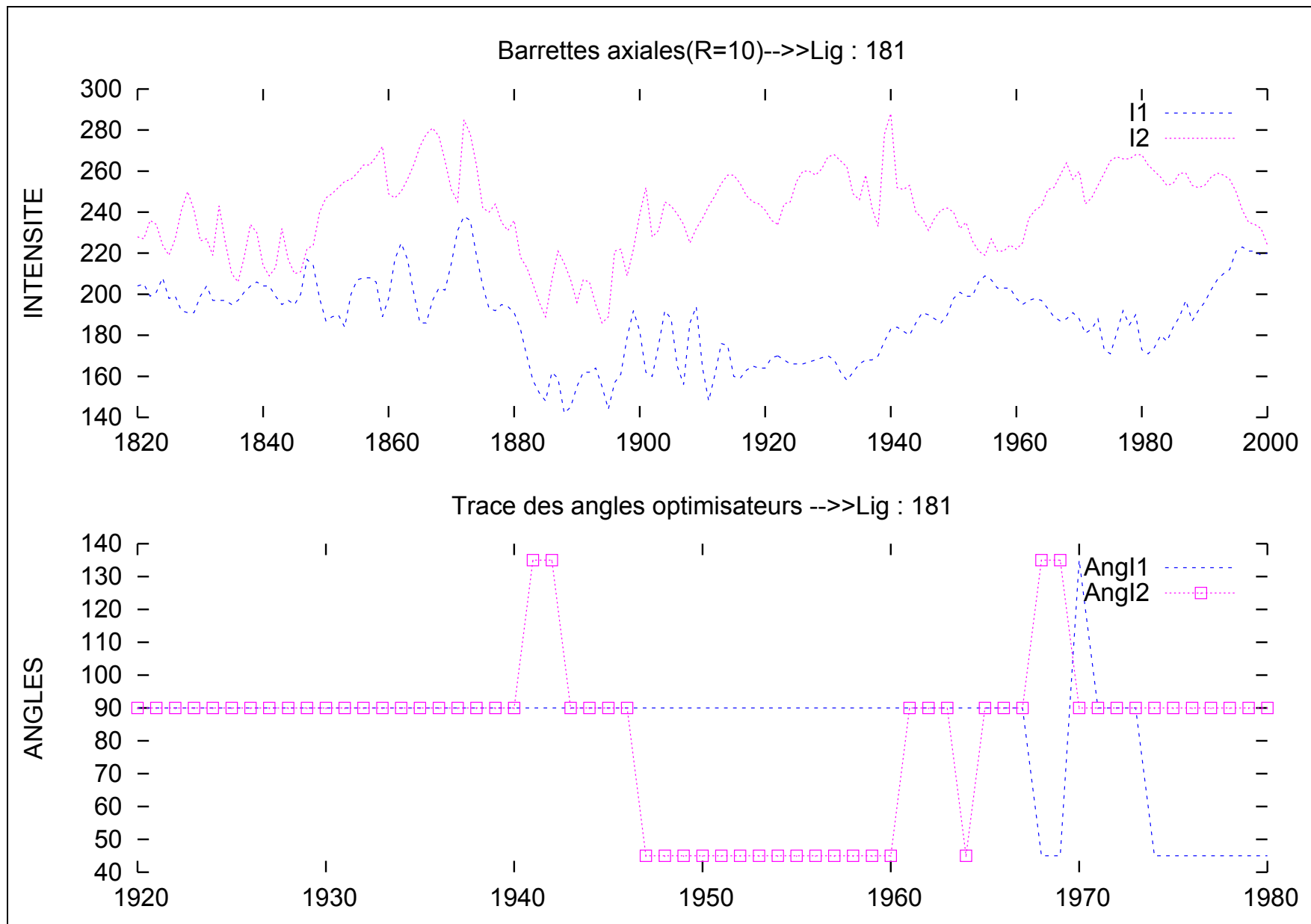


FIG. 5.19: Mise en relief de dunes de sable

5.3.8 Conclusion

La plupart de ces techniques reste relativement facile à formuler et à simuler sur un ordinateur. Elles sont testées sur deux images correspondantes à la région du Tibesti. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

D'un point de vue formel, nous remarquons que plusieurs techniques existent pour la détection de changement. Cependant, certaines ne sont pas adaptées pour notre problématique. Dans cette partie, nous avons essayé dans un premier temps d'évaluer chacun des codages évoqués ci-haut (cf. 5.2 & 5.3) par des visualisations des résultats obtenus. En second lieu, nous avons situé les avantages et inconvénients des différentes techniques que nous avons mises au point.

Le speckle est un phénomène non directionnel et inhérent aux images SAR. Dans le but d'atténuer ces phénomènes, il est primordial de se tourner vers des algorithmes non directionnels. Ces algorithmes semblent être appropriés et générateurs d'angles d'incidences adéquats. D'où l'idée de mettre en oeuvre ce codage idoine.

5.4 Caractérisation des formes & paramètres statistiques

Les mesures statistiques apportent une information capitale sur les images radar. Leur usage n'est pas discriminant dans le cadre de la détection des agglomérations urbaines [45]. Cependant, des résultats fiables ont été trouvés dans le cas de détection de changement en zone dunaire [6].

5.4.1 Paramètres statistiques

Nous comptons, en premier lieu, définir de façon sommaire quelques concepts, entre autres, l'*écart-type* et le *coefficient de variation*.

◇ L'écart-type (σ)

Il subit le même phénomène que la moyenne, notée μ . De plus, il est lié à la moyenne lorsque le speckle est totalement développé. Ce concept de speckle totalement développé, est un peu hors propos dans le contexte de cette thèse. Le lecteur désireux d'en connaître un peu plus sur le sujet, peut, bien évidemment, consulter les documents [68] et [45].

◇ **Le coefficient de variation en Intensité** Le coefficient de variation en intensité noté C_I est le rapport de σ sur μ . Il est donné par la relation classique (5.9) ci dessous.

$$C_I = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.9)$$

Bien que plus intéressant, le coefficient de variation en intensité a tendance à subir le même type d'influence. Cependant, il nécessite de très grands échantillons pour être fiable et il peut prendre de grandes valeurs en présence de contours. Il est considérablement bruité par les objets à réflexion forte.

De tout ce qui précède, il apparait que les statistiques du premier ordre se classent en deux groupes : celles qui sont insuffisamment discriminantes (moyenne, écart-type) et celles dont l'utilisation est limitée à la détection des zones autres que la ville "moderne" (coefficient de variation et skewness).

5.4.2 Caractérisation des zones par rapport au coefficient de variation

Le coefficient de variation est une véritable mesure d'homogénéité de la texture de terrain. Pour son intérêt manifeste, il a été utilisé dans de nombreux travaux sur le radar [70].

En outre, le C_I est conjointement utilisé avec le coefficient de variation de speckle C_u pour distinguer les différents types de zones sur l'image à traiter [68]. Grâce à la valeur de ce coefficient, on peut faire une première classification en le comparant au coefficient de variation de speckle. De ce fait, il s'en suit que :

◇ **Zone homogène**

En théorie une telle zone est dite homogène si son coefficient de variation en intensité est inférieur à celui de variation de speckle c'est-à-dire : $C_I \leq C_u$.

◇ **Zone hétérogène**

Dans ce cas, on a $C_u \leq C_I \leq C_{max}$ où C_{max} représente la valeur maximale que peut prendre le coefficient de variation de speckle.

◇ **Zone très hétérogène**

On a $C_I \geq C_{max}$. Ce cas se présente quand le speckle n'est pas totalement développé.

Par ailleurs, C_u & C_{max} sont liés aux images L-vues par les relations suivantes :

◇ La valeur C_u

Pour une image L-vues, la valeur limite inférieure de C_I qui est C_u (dans des zones homogènes) est donnée par la relation suivante :

$$C_u = \frac{0.5227}{\sqrt{L}} \quad (\text{Image en Amplitude})$$

$$C_u = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (\text{Image en Intensité})$$

Où L représente le nombre de vues.

◇ La valeur C_{max}

La valeur de C_{max} est difficile à déterminer [71]. Une étude pour la détermination exacte de C_{max} en fonction des propriétés de l'image est menée. Pour le cas de filtre *Gamma MAP*, la valeur de C_{max} est donnée par :

$$C_{Amax} \approx \sqrt{2}.C_u \approx \sqrt{2}.\frac{0.533}{\sqrt{L}} \quad (\text{Image en Amplitude})$$

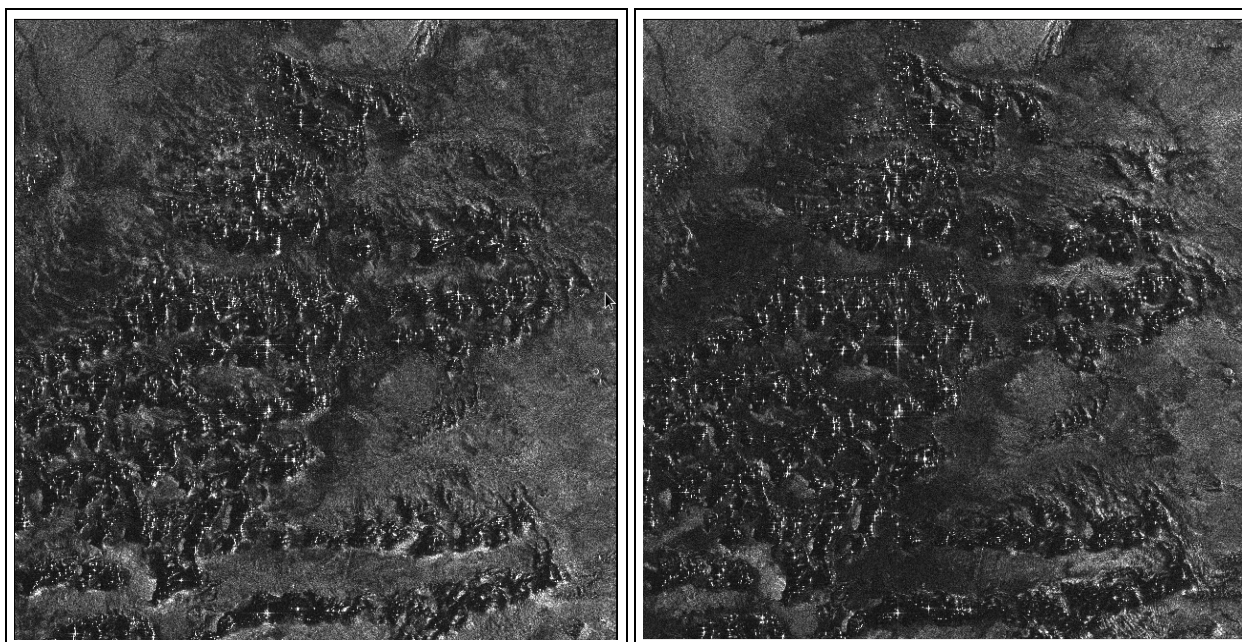
$$C_{Imax} \approx \sqrt{2}.C_u \approx \sqrt{2}.\frac{1}{\sqrt{L}} \quad (\text{Image en Intensité})$$

5.4.3 Le coefficient de variation

En imagerie SAR l'exploitation du coefficient de variations se fait souvent comme pour la moyenne en utilisant un calcul sur un voisinage glissant. Afin de tester l'intérêt de cet indice pour la caractérisation des dunes nous avons lancé son calcul sur des images de dates différentes avec un voisinage de forme carrée et de largeur 11.

Le résultat de ce traitement sur les images des figures FIG. 5.20(a), respectivement FIG. 5.20(b) est présenté sur les figures FIG. 5.21(a), respectivement FIG. 5.21(b). La différence entre ces deux images est présentée quand à elle sur la figure FIG. 5.22.

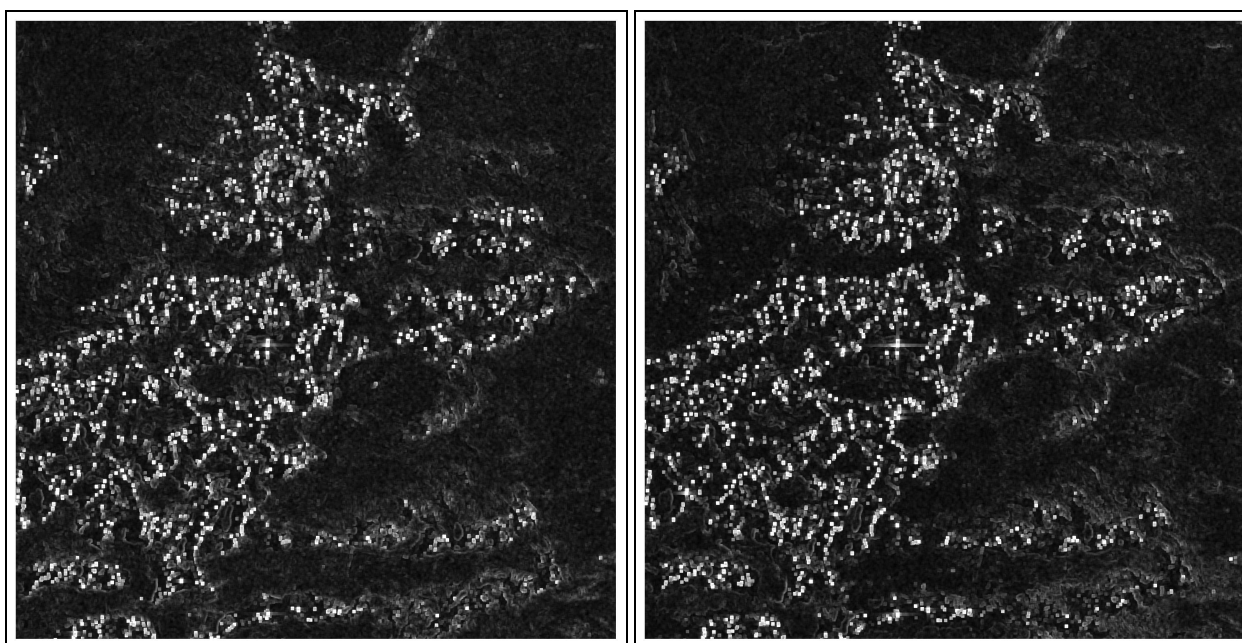
Ce résultat montre que le coefficient de variations permet une bonne mise en évidence des points brillants, mais d'une façon très étalée. Il n'apporte par contre pas une grande quantité d'information pour la discrimination des zones des dunes et des roches. Sa valeur correspond par contre au speckle



(a) Image SAR ENVISAT 2004

(b) Image SAR ENVISAT 2006

FIG. 5.20: Un champ de dunes en imagerie SAR ENVISAT



(a) Image SAR ENVISAT 2004

(b) Image SAR ENVISAT 2006

FIG. 5.21: Coefficient de variation glissant sur l'imagerie SAR ENVISAT



FIG. 5.22: Différence de coefficient de variation glissant entre 2004 et 2006

pleinement développé sur nos images et confirme notre hypothèse selon laquelle les ombres sont très peu présentes dans nos images.

Nous avons calculé la différence entre les deux images de coefficient de variation de façon à voir si son exploitation multitemporelle pouvait être intéressante pour voir les changements dans les zones dunaires. À l'échelle de la dynamique de ses variations, l'image de la figure FIG. 5.22 montre que les variations dans les champs de dunes se reportent surtout au voisinage des points brillants ce qui montre leur tendance à se déplacer mais n'apporte que peu d'information exploitable de façon quantitative.

Après ce bref état de lieu sur la caractérisation des formes & paramètres statistiques, nous commençons à présenter trois nouvelles approches que nous avons mises au point dans les trois sections qui suivent.

5.5 Les points brillants

Cette section est composée de deux sous-sections. Dans un premier temps, nous situons le problème dans son contexte global. Ensuite, nous donnons deux définitions relatives au point brillant et à une frange brillante afin de faciliter la lecture du chapitre et surtout sa compréhension par des lecteurs intéressés.

Lors d'un traitement informatique sur des images satellites, on se rend compte que plusieurs informations sont disponibles. L'immensité des informations renfermée par une image satellite conduit à de nouvelles approches de résolutions de problème des images satellitaires. Ces approches doivent prendre en compte, d'une part, l'aspect de speckle inhérent à toute image satellite, d'autre part, la distorsion géométrique due à l'angle d'incidence de la plate-forme d'acquisition et la pente de relief. Elles prennent en considération l'aspect d'orientation de la direction des vents et des dunes de sable en privilégiant les algorithmes non directionnels.

Lorsque l'image correspondant à la scène imagée renferme diverses régions de natures différentes, il va falloir trouver un moyen efficace de séparer les zones d'étude avant de pouvoir penser à un éventuel formalisme [6]. D'ailleurs, c'est dans cette optique que nous avons mis en place une technique permettant de séparer les zones dunaires des zones rocheuses dans la section 5.6. Elle s'appuie particulièrement sur les points brillants et le principe de corrélation.

Ainsi donc, nous commençons à donner les deux définitions simplistes relatives au point brillant et de la frange brillante.

Peu de définitions relatives au point brillant et à la frange brillante existent dans la littérature. Ce qui nous amène à introduire ces concepts afin de rendre accessible la lecture du manuscrit.

5.5.1 Définitions

Définition : point brillant

Un point est dit brillant, lorsque sa valeur radiométrique dans l'image est dominante, c'est-à-dire la plus élevée. On le reconnaît par sa particularité d'être singulier.

Vu l'immensité d'information renfermée par la matrice d'image, il est très difficile, voire impossible d'exhiber ce point particulier. En pratique, le point brillant n'existe pas, mais plutôt il s'agit d'un ensemble de points brillants. Ceci nous amène à introduire par la suite la notion de franges brillantes.

Définition : frange brillante

Une frange brillante, n'est d'autre qu'un ensemble longiligne de points brillants. La circonférence de la frange brillante est limitée à une dizaine voire une centaine de pixels. Elle dépend du rayon du voisinage utilisé.

En général, en se servant des franges brillantes, on peut assez facilement à partir d'images SAR des zones désertiques séparer un changement notable de l'environnement de celui de déplacement des cordons de dunes.

5.5.1.1 Détection des points brillants issus de réflexions déterministes

Cette partie s'inspire des travaux de thèse de Gouinaud [45].

Les points brillants sont des pixels résultants de réflexions de Fresnel favorables ou des interférences constructives dues aux points singuliers (tôles, engins en panne dans le désert, site particulier, etc). Cette technique est basée sur l'évaluation de la quantité des pixels incohérents et la comparaison avec la probabilité d'apparition de grandes valeurs radiométriques.

Si une région de l'image suit une loi $\chi^2(khi - deux)$, la probabilité d'apparition des pixels de valeur A est connue. Classiquement, le paramètre α de la loi χ est déduit de la mesure de la moyenne de la zone, ce qui permet ensuite de comparer des fréquences issues de l'histogramme et les probabilités théoriques d'apparition de fortes valeurs. Cependant, l'évaluation de la moyenne est peu fiable et les points brillants introduisent un biais important dans le calcul.

Dans le cas de l'utilisation de la moyenne sur des images satellites, les pixels brillants ont un compte numérique relativement plus élevé que celui des pixels diffus. En pratique, pour la moyenne classique, un pixel brillant à l'influence de 5 pixels ordinaires. Ceci suffit à décaler la moyenne de 5% et par conséquent à faire admettre des pixels brillants comme des pixels confus.

Pour supprimer ce biais, Gouinaud[45] utilise donc l'évaluation du paramètre α grâce au mode

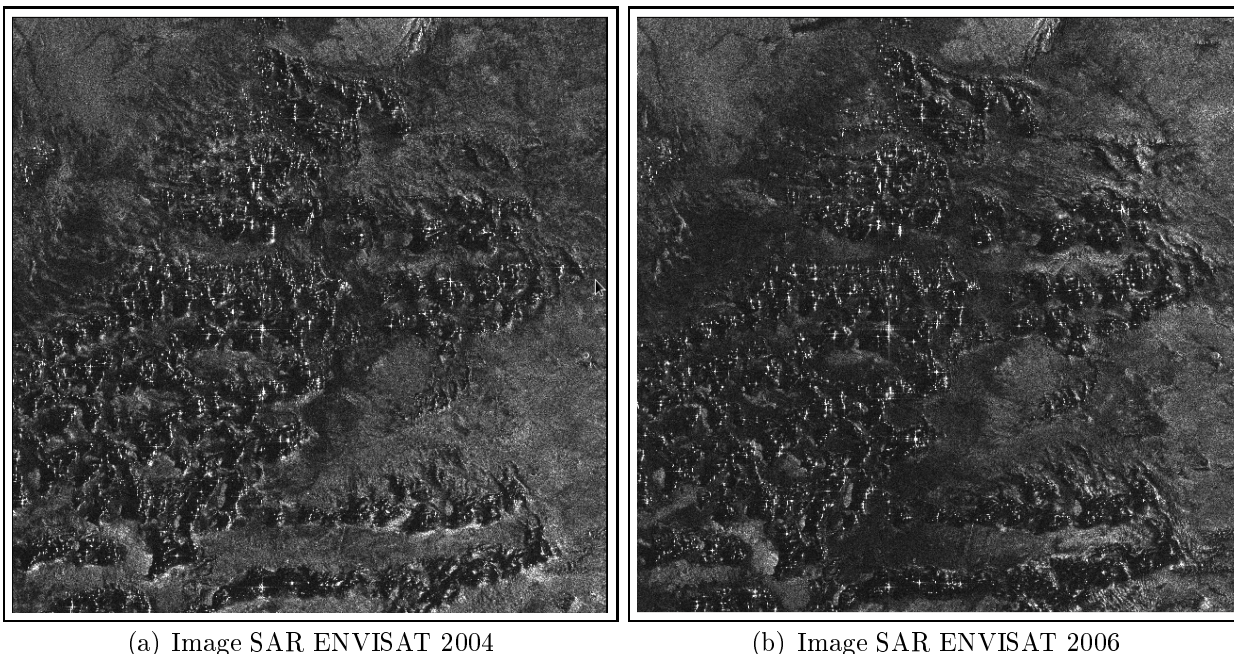


FIG. 5.23: Points brillants sur un champ de dunes

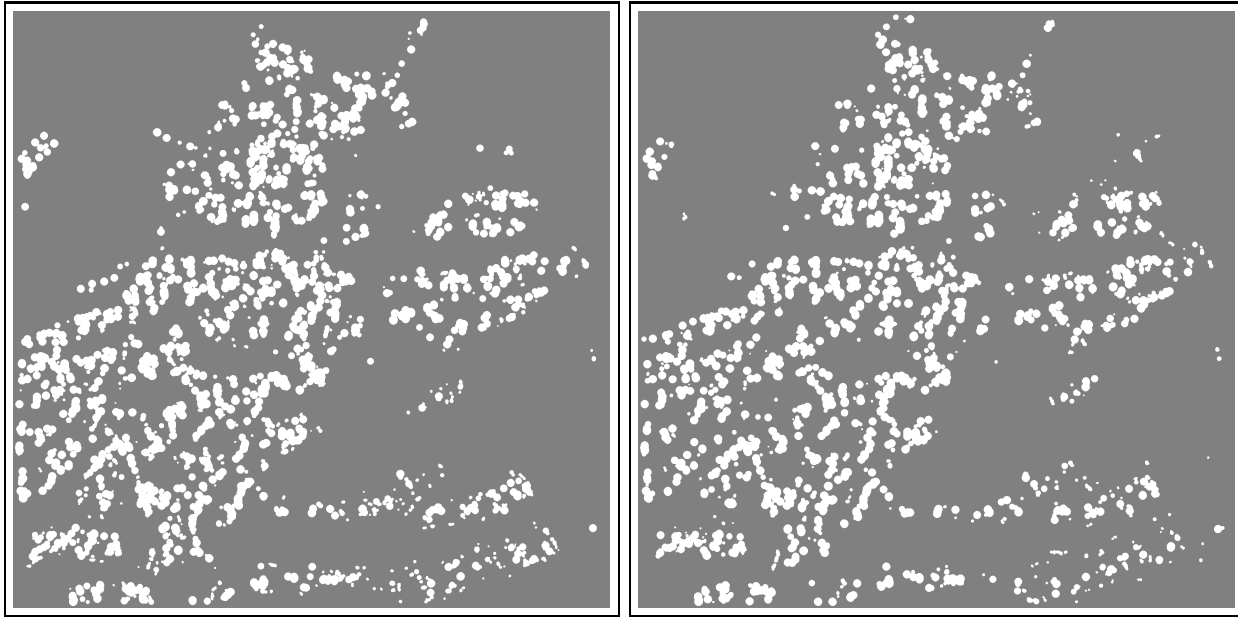
de l'histogramme de la région, c'est-à-dire au niveau de gris de fréquence d'apparition maximum. Dans ce cas précis de la détection des agglomérations en imagerie radar, le paramètre α joue un rôle déterminant. Il permet d'évaluer correctement la quantité de pixels brillants présents dans une zone puisque ceux-ci n'interviennent pas dans le calcul de α . Les zones dans lesquelles il apparaît une forte quantité de pixels brillants sont définitivement classées comme des bourgades dans la mesure où chaque pixel possède deux autres voisins dont la probabilité d'apparaître est aussi aberrante.

5.5.2 Recherche et suivi des points brillants

Afin de tester l'intérêt de l'utilisation de la recherche des points brillants pour le suivi de dunes, nous réalisons la détection telle que décrite ci-dessus sur deux images extraites des deux scènes à notre disposition (figure 5.23(a) et 5.23(b)). Les deux scènes ont été superposées via des points d'amer choisis sur des parties rocheuses apparentes de part et d'autre. Elles ont une résolution de 30 mètres, font 2048 par 2048 pixels et la détection ne prend que 2 ou 3 secondes sur un ordinateur portable ordinaire.

Les points brillants étant issus d'un seul pixel nous complétons la détection des points brillants par un algorithme qui trace de petits disques à leur emplacement, l'assemblage de tous ces disques permettant de les visualiser de façon adhoc.

Nous présentons les résultats de la détection des points brillants sur l'image de 2004 de la figure 5.24(a) et ceux de 2006 sur la figure 5.24(b). Les deux images permettent de se rendre compte de la capacité de détection des dunes par cet algorithme. En effet, aussi bien sur l'image de 2004 que sur celle de 2006 les pixels sont correctement marqués dans les zones de dunes et il n'y en a pas dans les zones de plus faible occurrence du sable. Sur les résultats nous voyons également apparaître des suites de points brillants permettant de mettre en évidence des formes correspondantes à des cordons de dunes. Celles-ci sont orientées quasiment dans le sens de l'alizé, ce qui permet d'envisager



(a) Image SAR ENVISAT 2004

(b) Image SAR ENVISAT 2006

FIG. 5.24: Détection des points brillants sur un champ de dunes

une utilisation pour la mesure des déplacements.

Afin de constater le bon positionnement des pixels sur les images nous réalisons l'incrustation de la différence des résultats sur une des deux scènes originales. Pratiquement nous procédons ainsi :

- Nous marquons les zones où les détections sur les deux dates coïncident avec un niveau de gris de 255 (blanc)
- Nous marquons les zones où les détections sont présentes uniquement en 2006 avec un niveau de gris de 192 (gris clair).
- Nous marquons les zones où les détections sont présentes uniquement en 2004 avec un niveau de gris de 128 (gris foncé).
- Les zones non détectées sont mises à zéro.

Cette image est ensuite incrustée comme masque sur l'image de 2004 (figure 5.23(a)) ce qui donne l'image de la figure 5.25. Nous en présentons une vue détaillée sur la figure 5.26, c'est-à-dire un extrait de l'image de la figure FIG. 5.25.

Cette image permet de constater le déplacement des pixels brillants dans le sens des couloirs de dunes, soit majoritairement dans le sens de l'alizé. Nous remarquons aussi que certains points disparaissent ou apparaissent sans qu'il soit possible de dire s'il s'agit de zone d'un effet lié au changement léger de prise de vue ou à un changement de volume de certaines dunes. L'apparition majoritaire de nouveaux points se faisant au sud-ouest de grosse concentration de points brillants, et la disparition se faisant majoritairement au nord ouest nous incite cependant à privilégier cette hypothèse.

5.6 Détection conjointe & corrélations

Dans cette partie on va mettre les méthodes qui permettent une caractérisation d'une zone en utilisant un codage combinant deux images. La corrélation est l'exemple de base, car elle constitue

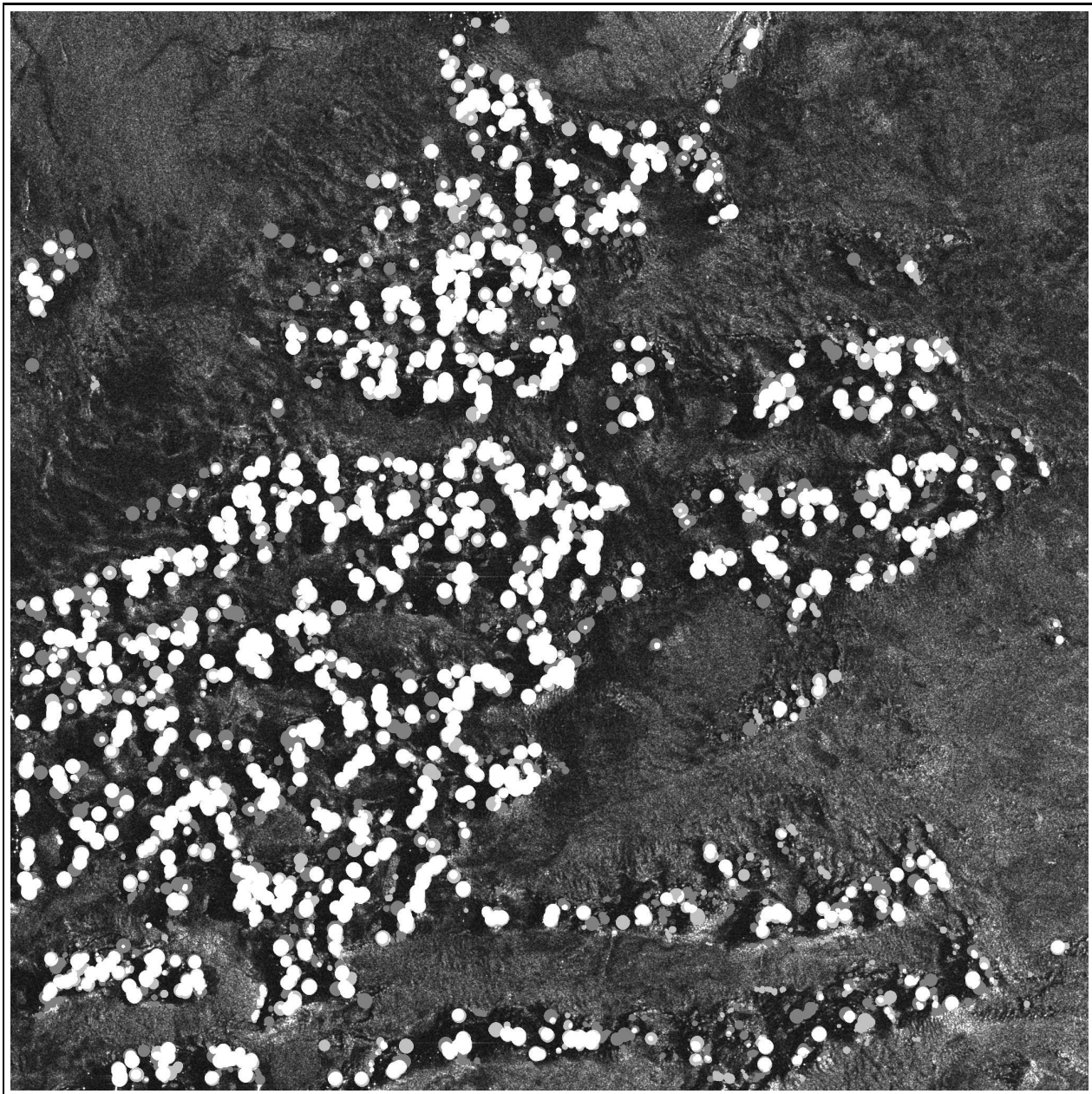


FIG. 5.25: Incrustation de la différence des points brillants sur l'image de 2004, en blanc les dunes co-détectées, en gris clair les détections faites sur 2006 uniquement, en gris foncé les détections faites en 2004 uniquement

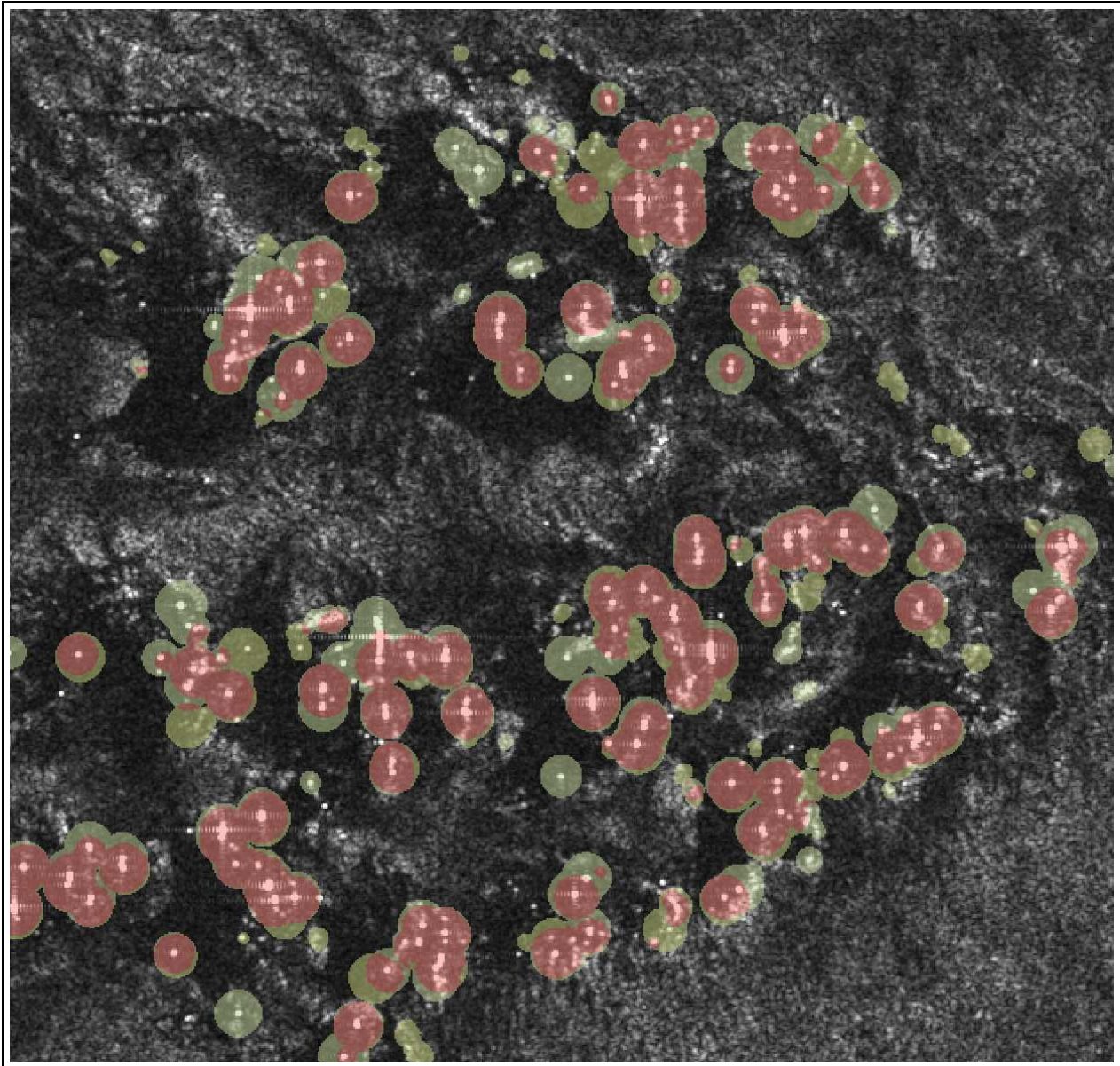


FIG. 5.26: Incrustation de la différence des points brillants sur l'image de 2004, en rouge les dunes co-détectées, en vert clair les détections faites sur 2006 uniquement, en vert foncé les détections faites en 2004 uniquement

une mesure de ressemblance très efficace.

Ainsi donc, dans un premier temps, nous énonçons le principe de la détection conjointe et celui de la corrélation où un cas applicatif est donné à titre illustratif. Nous faisons le lien de la corrélation avec les franges brillantes pour étayer nos hypothèses ou du moins nos intuitions.

Le mobile de la détection conjointe est de repérer c'est-à-dire "identifier" les points singuliers d'une image numérique. Ensuite, faire ressortir s'il y a lieu, une/la corrélation entre deux images résultantes d'une même scène, qui sont acquises à de différentes dates.

5.6.1 Principe de la détection conjointe

Dans ses travaux de thèse, Antoine LEFEBVRE [3] disait « *dans le cadre de la détection de changements appliquée à des images satellites haute résolution qui sont caractérisées par une résolution spectrale peu élevée, il convient de revoir les méthodes existantes, d'identifier leurs avantages et inconvénients afin de mieux définir une méthode adaptée aux caractéristiques de ces données* ». Implicitement, cela veut dire que pour trouver des résultats probants, il est primordial d'innover, surtout en imagerie de télédétection afin de répondre aux besoins croissants de la communauté scientifique et publique. Ainsi donc, dans cette thématique des éléments désertiques sur images SAR, il semble judicieux d'oser et de croire à des nouvelles techniques, pouvant intégrer au mieux les caractéristiques de la région d'étude.

C'est pourquoi, nous avons opté de proposer une nouvelle technique de détection de changement dunaire, se basant sur le principe de la corrélation. L'idée motrice consiste à fournir dans un premier temps, un traitement automatique capable de séparer les effets d'hétérogénéité dus à la texture de ceux dus au speckle. Nous voulons préserver autant que possible la texture, là où elle est présente dans l'image de manière à éviter les confusions entre régions de même radiométrie moyenne, mais de textures différentes. Une amélioration radiométrique préalable est donc nécessaire. À ce propos, les hypothèses de Goodman [72] permettent de calculer les statistiques de speckle avant et après détection en amplitude comme un bruit multiplicatif.

Dans le cas d'une étude multi-temporelle, la détection des changements est réalisée en fonction des images disponibles en archives. Celles-ci proviennent souvent de différentes sources et d'origines diverses. Nous nous limitons à des données comparables, c'est-à-dire issues du même capteur, même si un radar qui implémentait les mêmes traitements et ayant les mêmes caractéristiques conviendrait.

5.6.2 Corrélation

À l'origine, la corrélation est utilisée en mécanique, sciences des matériaux et mécanique de fluide. Elle permet de déterminer des champs de déformations, de déceler des fissures ou fournir des champs de déplacements à des procédures d'identification. La technique de corrélation utilise les niveaux de gris associés à chacun des pixels de l'image. Elle utilise deux images en entrée.

Elle est introduite pour la première fois dans les années 1980 aux USA. La corrélation d'images est utilisée afin de mesurer des déplacements et en déduire de déformations. Tandis que les techniques classiques fournissent des valeurs moyennées en un point, la corrélation d'images permet d'accéder à des champs de valeurs sur l'ensemble de la surface observée.

Traditionnellement la corrélation d'images est une approche pour mesurer le champ de déplacement d'une surface ou d'une image déformée par rapport à une image de référence. On suppose alors que toute différence entre l'image de référence et l'image déformée provient du seul effet de déplacement du capteur par rapport à la structure observée. Le calcul de corrélation s'effectue en-

suite automatiquement sur toute la zone d'étude par propagation suivant une fenêtre de voisinage. La structure à explorer est supposée être composée de données de radiométrie constante.

Dans notre cas, nous combinons deux types de déformations :

- Le déplacement de certains éléments de terrain. Il s'agit du sable qui modifie la forme des dunes et donc expose une nouvelle géométrie.
- Les conditions de visée différentes dues à l'écart de trajectoire du satellite entre deux prises de vue.

L'usage le plus courant de la corrélation est la stéréo restitution qui consiste à calculer le relief d'un terrain à partir de deux vues détaillées. Notre problématique est de discriminer des zones où il y a des déplacements et si possible de les mesurer.

Dans le premier cas on cherche à déterminer une déformation due à l'optique ce qui induit que les calculs de corrélation sont faits sur un voisinage que l'on déplace autour du point dont on cherche l'altitude. Dans notre cas nous allons compenser les déformations géométriques dues à la prise de vue par un recalage global, puis mesurer la corrélation entre les deux images mais pour les mêmes coordonnées de pixel. Ainsi nous verrons s'il y a eu des changements et pourront par exemple déterminer le type de terrain auquel nous avons à faire. Cette approche est possible du fait que les conditions d'acquisition de deux images sont extrêmement proches. Il s'agit du même satellite, du même orbite, des mêmes paramètres d'acquisition et du même produit image (PRI). Dans le cas où ses caractéristiques devraient varier, il faudrait distinguer les déformations qu'elles induisent avant toute utilisation de ce qui suit.

Étant donné un couple d'images I_1 et I_2 de la structure. Une image se présente comme une fonction discrète de niveaux de gris répartis sur les pixels formant une grille régulière. On opère un choix d'indice de voisinage. Cet indice détermine un périmètre, appelé zone d'action. Elle est identique pour tout pixel courant de l'image. Elle est discrétisée en un ensemble de carrés de pixels, des fois appelés patterns où nous calculons nos mesures.

Notre méthode est basée sur le calcul de la corrélation des fenêtres entre deux images acquises en deux dates différentes.

5.6.2.1 Calcul de la corrélation

Il existe de nombreuses mesures de ressemblance d'image analogue à une mesure de corrélation linéaire. Nous avons cependant limité notre étude à celle-ci du fait qu'elle est basée sur des calculs de moyennes. Elle est naturellement robuste au bruit statistique comme celui induit par le speckle.

La corrélation C entre une image I_1 et une image I_2 au niveau de pixel de coordonnées (x, y) est calculée d'une manière classique par :

$$C(x, y) = \sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-n}^{j=n} \frac{I_1(x+i, y+j)I_2(x+i, y+j) - E_1E_2}{\sigma_1\sigma_2} \quad (5.10)$$

Où : E_a et σ_a sont la moyenne et l'écart-type de l'image I_a .

Cette valeur de corrélation est comprise entre $[-1, 1]$. Les deux valeurs extrêmes expriment soit une très forte ressemblance soit un effet négatif.

Il faut noter ici que la valeur moyenne de la corrélation sur une image simulée de speckle pleinement développé est de l'ordre de 0.1 à 0.05 suivant la taille des échantillons sur des images 3 look. Des zones plus texturées devraient donc générer des valeurs de corrélation plus grandes en valeurs absolues suivant qu'elles soient décalées ou sans changement.

5.6.2.2 Application

Afin d'évaluer l'intérêt de la corrélation pour notre problématique nous calculons sa valeur sur des voisinages de tailles carrées entre deux images.

Nous procédons comme suit :

- ◇ on prend deux images I_1 et I_2 , superposables, correspondant à une zone désertique ;
- ◇ pour chaque pixel de l'image I_1 , on calcule la corrélation avec l'image I_2 , sur une fenêtre de 5x5 pixels ;
- ◇ on augmente la taille de la fenêtre jusqu'à 30x30, correspondant à une surface de 900x900 mètres carrés

En observant pour chaque pixel de la séquence de valeurs, on peut remarquer que plus on augmente la taille de la fenêtre, plus la corrélation des valeurs accroissent sur les zones correspondantes aux dunes, alors qu'ils n'ont que de petites variations sur des zones avec des roches.

Nous avons regroupé des valeurs typiques dans le tableau TAB. 5.5 ci-dessous.

largeur de la fenêtre	5	10	15	20	25	30
zones de roches	0.1	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07
zones de dunes	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6

TAB. 5.5: Effet de la fenêtre sur la corrélation

Ce phénomène de changement de valeurs s'explique par le fait que sur les zones de dunes, plus la taille de la fenêtre augmente, plus nous avons de chance de trouver un pixel brillant dans la fenêtre de voisinage. Celui-ci créant une suite d'ancre qui même s'il est un pixel décalé crée un effet de texture. À l'inverse sur les zones de roches qui présentent une faible texture et où le speckle domine la valeur diminue jusqu'à une valeur classique du speckle. Les images résultats de la corrélation sont montrées sur la figure FIG. 5.30 et dans le tableau TAB. 5.5.

En résumé nous remarquons que le processus dune organise le signal d'une façon que la corrélation révèle. Nous avons ensuite tenté d'utiliser la corrélation pour caractériser les déplacements mais les résultats ont été décevants dans la mesure où les valeurs sont peu importantes sur les zones où il y a des déplacements.

Par contre, il nous a paru intéressant d'exploiter le résultat précédent afin de réaliser une classification permettant de discriminer les zones de dunes du reste de l'image. Ceci demande deux choses :

- le choix d'un processus de classification
- Le choix d'une méthode d'apprentissage des zones de dunes et de non dunes.

Une classification consiste à attribuer à chaque pixel une valeur représentant non plus sa radiométrie mais son appartenance à un type de zone. Pratiquement cela revient à choisir une nouvelle valeur pour chaque pixel en tenant compte d'une distance par rapport à des valeurs représentatives d'un type de sol connu. Pour chaque pixel on choisit donc la classe c qui mesure la distance entre la radiométrie d'un pixel et celle de la classe. Ce processus ne peut pas être appliqué en général dans le cas des images radar du fait du speckle. Il faut donc travailler avec des images dérivées que nous appellerons des indices.

Nous choisirons donc pour un pixel (x,y) la classe c qui mesure la distance entre un vecteur de valeurs d'indice représentatif pour chaque classe et les valeurs calculées pour le pixel (x,y) .

Il existe une littérature pléthorique sur le choix de ses distances. Notre problème n'étant pas de trouver la meilleure distance de classification mais de trouver la pertinence de l'utilisation de corrélation pour notre problématique. Nous avons choisi d'utiliser une classification classique basée sur la distance euclidienne à un centre de classe. La distance s'écrit donc pour un pixel (x,y) et une classe c .

$$d_{x,y}^c = \sqrt{\sum_{i=0}^n (I(x,y) - I_i^c)^2} \quad (5.11)$$

où $I_i(x,y)$ est la valeur en x,y de l'indice i et I_i^c la valeur représentative de l'indice i pour la classe c .

Dans ce procédé, le choix de la classe est ensuite fait en choisissant la classe c qui correspond à la plus petite valeur de d^c pour chaque pixel. Cette valeur étant calculée pour chaque pixel, la cohérence spatiale de la classe dépendra fortement de celle des indices. Nous verrons dans la suite que nos indices nous obligeront à introduire un processus de lissage appelé régularisation. La détermination des valeurs I_i^c représentatives des classes s'appelle l'apprentissage.

La détermination de ses valeurs a aussi fait couler beaucoup d'encre mais on peut distinguer deux classes de méthodes :

- l'apprentissage manuel qui se fut via des parcelles de terrain dont on connaît la nature à priori,
- l'apprentissage automatique qui détermine la valeur représentative par une caractéristique connue de l'image d'indice.

La qualité d'un indice se mesurait également par sa capacité à former des valeurs représentatives possibles. Nous avons choisi d'utiliser la deuxième approche dans la suite de ce travail.

Afin de voir si les variations de corrélation apportent une information fiable nous réalisons donc la classification suivante :

- nous prenons comme indice les images de corrélation avec les différentes tailles de fenêtre
- nous faisons un apprentissage en utilisant les histogrammes des images de corrélation.

En effet, l'observation des histogrammes du maximum de la corrélation montre que les valeurs sont coupées en deux tas très distinguables. Notre méthode d'apprentissage se base donc sur la recherche des deux pré maximum de corrélation les plus distants dans les histogrammes de toutes les images de corrélation.

Une fois ses éléments déterminés nous avons calculé une première classification. Celle-ci donne un résultat difficilement exploitable car ayant une cohérence spatiale trop faible. Il nous a donc fallu introduire deux opérations supplémentaires :

- introduire un processus de régularisation spatiale constitué d'une distance supplémentaire forçant la cohérence des classes
- introduire de ce fait un processus itératif de réévaluation des classes du fait que la distance ne peut plus être déterminée directement.

En pratique, nous ajoutons une distance d'_c déterminée par

$$d'_c(x,y) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n \mathbb{1}(C(x_0 + i, y_0 + j) \neq c) \quad (5.12)$$

où c est l'image de classe, $\mathbb{1}$ la fonction caractéristique d'une variable aléatoire et C désigne la corrélation. Ce qui revient à ajouter à la distance 1 pour chaque pixel qui n'appartient pas à la classe c .

Cette introduction fait que la distance dépend de l'image de classe elle-même et donc qu'elle ne peut être déterminée que par un processus itératif basé sur l'essai des différentes valeurs possibles.

La modification de la distance n'était que locale. Nous sommes dans le cadre des hypothèses de champs Markoviens ce qui nous garantit la convergence de tout procédé itératif indépendamment de l'ordre de traitement des pixels.

Nous avons donc choisi une technique de recuit simulé. Cette méthode consiste à choisir dans un premier temps de façon aléatoire la classe de chaque pixel puis à révisiter chaque pixel de façon à choisir la bonne classe. Le processus de recuit proprement dit consiste à provoquer des choix des classes augmentant la distance de façon à sentir de minimum locaux de distances qui conduirait à terme à allonger la durée du processus itératif. Une fois que la proportion des pixels changeait d'une itération sur l'autre est devenue faible, le processus est arrêté.

5.6.3 Résultats et interprétation

Les images de la figure FIG. 5.27 à la figure FIG. 5.31 ont la même dimension (2048,2048) pixels où I_1 représente l'image acquise en 2004 et I_2 celle de 2006.

5.6.3.1 Résultats via les profils

La qualité de changement intervenue peut être mesurée par la corrélation de deux images satellites. Cependant, aux vues de la taille d'un échantillon (2048 x 2048 pixels, ENVISAT dispose de pixel sol 12,5 m x 12,5 m), les résultats issus de cette technique tout comme ceux évoqués dans la section 5.3 ne permettraient de quantifier aisément les changements ni de les localiser. Toutefois, ils donnent une idée globale pour l'ensemble de l'image. C'est pourquoi il est souhaitable d'appliquer la technique reposant sur la génération de profils aux résultats obtenus, non pas à l'échelle de l'image entière, mais à celle d'une ligne de l'image en prenant en compte un voisinage de l'ordre de grandeur du pixel. Cette préhension du voisinage permet de quantifier au mieux le changement intervenu sur chaque pixel. Une illustration par profils est donnée, cf. FIG.5.27 & FIG.5.28.

En effet, par exemple la figure FIG.5.28 montre pour des zones dunaires que la direction du vent reste quasi-stationnaire par endroit. Ainsi, un ordre de grandeur de l'orientation du vent peut être donné. En ce qui concerne les résultats de covariances, la figure FIG.5.28 illustre qu'à plus de 72.54%, le vent reste dans la direction Nord → Sud. À 21.56%, dans la direction Nord-Est → Sud-Ouest, 5.88% dans la direction Nord-Ouest → Sud-Est et rien d'autre. Ces résultats sont respectivement de 54.90%, 27.42% et 17.64% pour le cas de la différence axiale avec un rayon du voisinage $n=5$. D'une part, elle confirme la similarité avec les résultats des études menées sur le terrain.

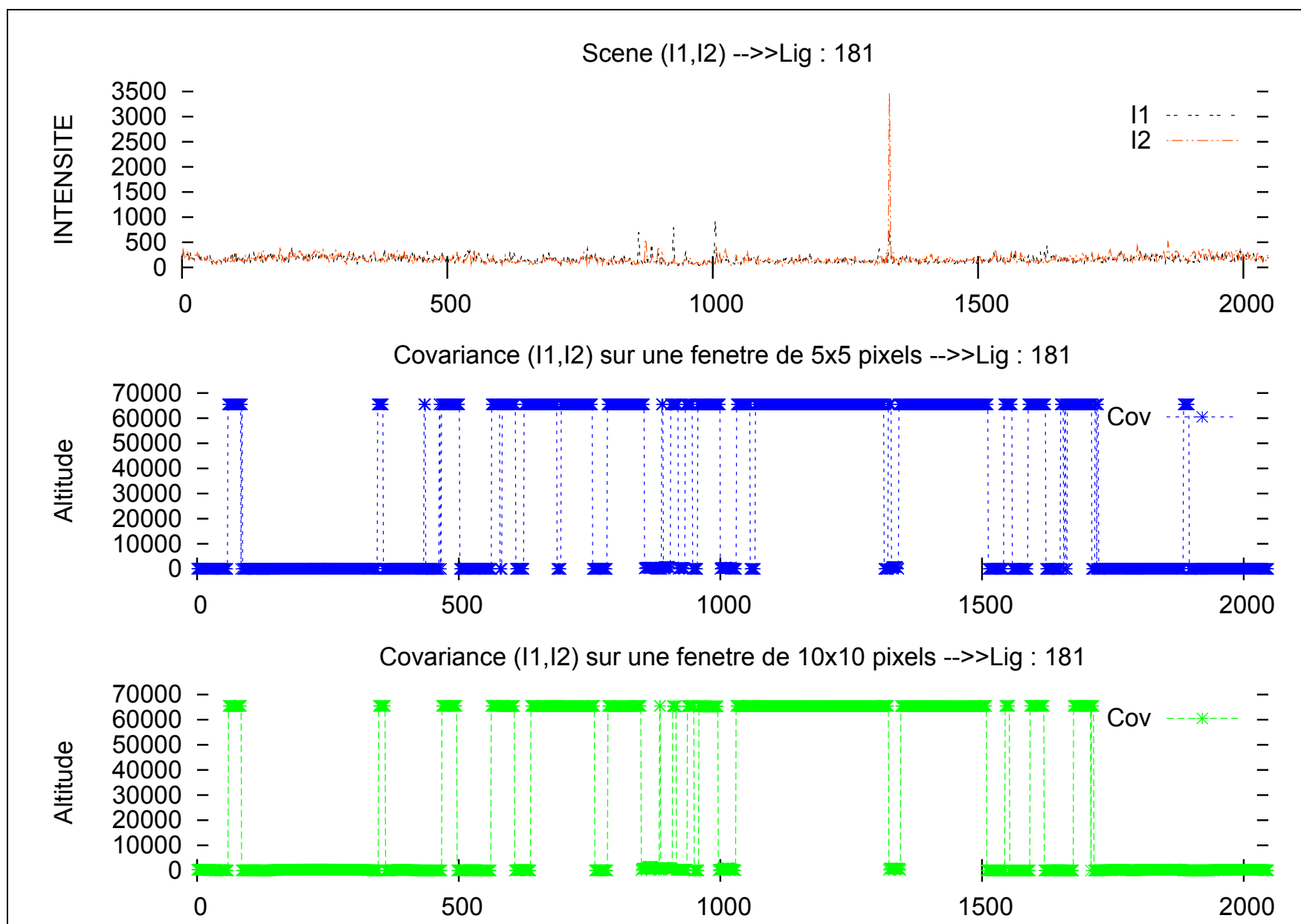


FIG. 5.27: Courbes issues de tables des données/Covariance

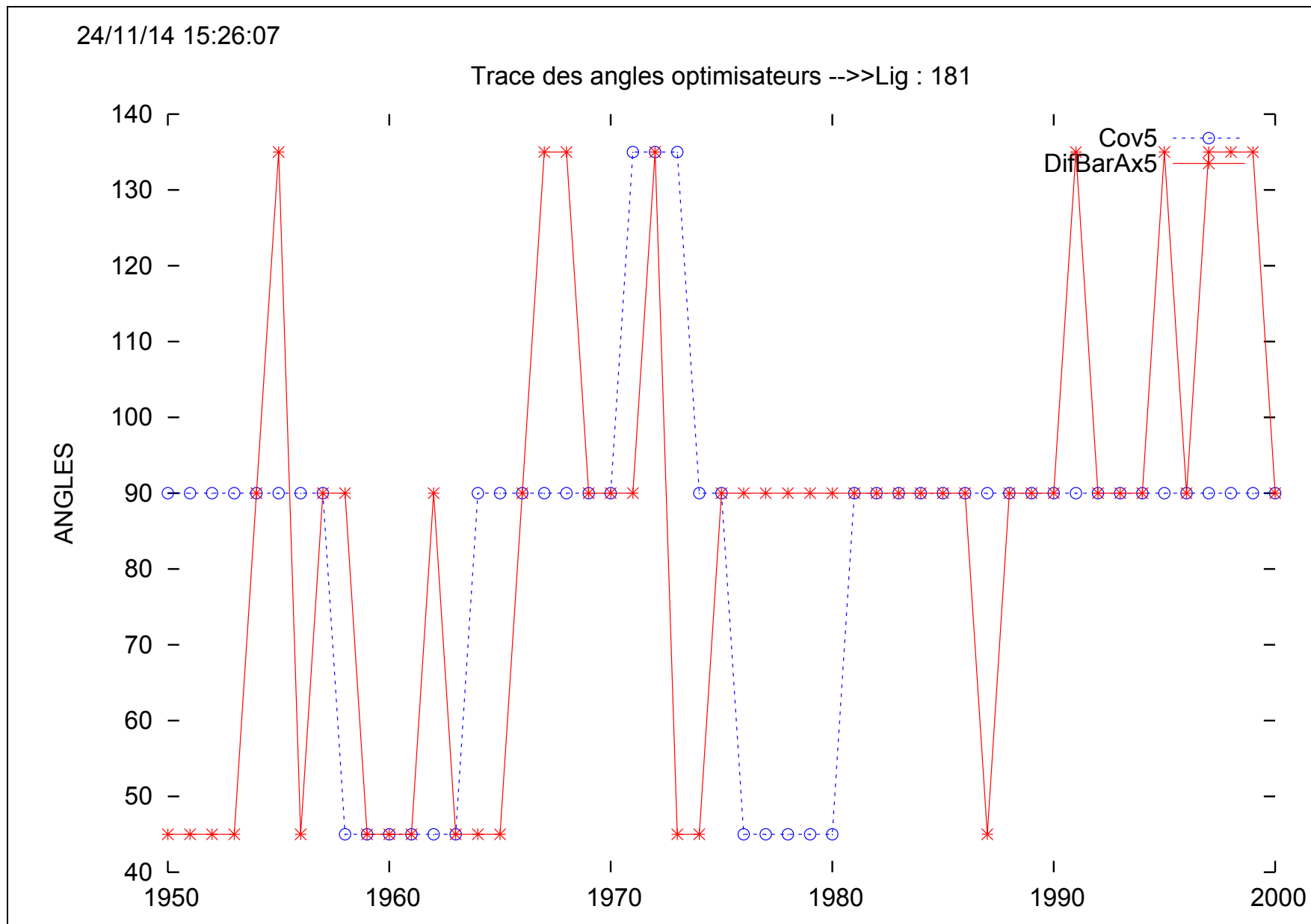
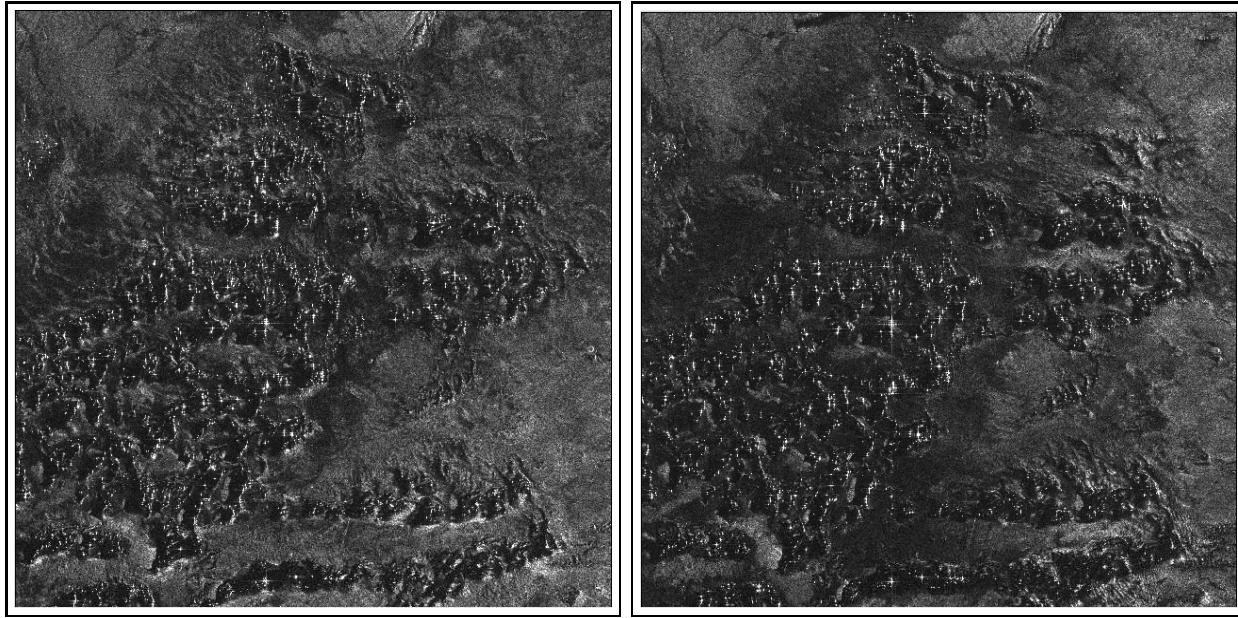


FIG. 5.28: Courbes issues de tables des données/angles optimisateurs-covariances



(a) Image d'octobre 2004

(b) Image de novembre 2006

FIG. 5.29: Images de Tibesti

La figure FIG.5.29, nous montre des extraits de 2048x2048 pixels à partir de deux images d'ENVISAT acquises en octobre 2004 et novembre 2006. Sur l'image, avec une résolution de 30 mètres, on peut facilement identifier différentes zones de dunes séparées par des régions de rochers avec un sol dur à la surface.

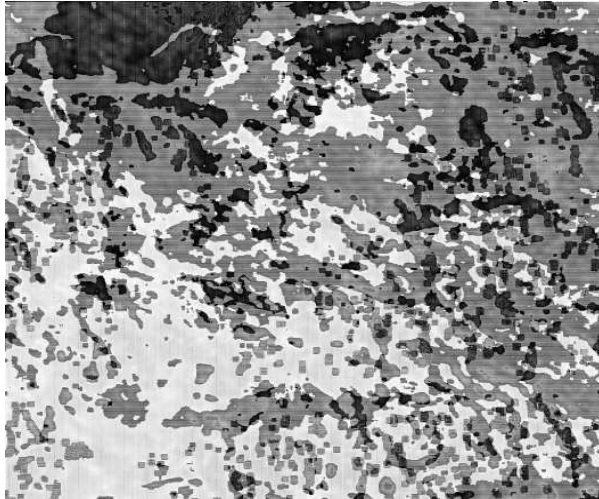
Nous présentons dans la figure FIG.5.31(a) le résultat d'une classification markovienne basé sur l'indice de texture classique (moyenne, écart-type, symétrie) et sur la figure FIG.5.31(b), le résultat sur les images de corrélation de la figure FIG. 5.30. Pour ces deux cas, la même classification classique est calculée et utilisant une relation linéaire avec la distance par rapport à la moyenne de la classe, optimisée par recuit simulé. Ce résultat montre que notre méthode discrimine proprement les zones de dunes des zones de roches, et ce quelle que soit la taille des dunes sur les sites étudiés. En revanche, on constate que, en dépit de la régularisation imposée dans la classification, les indices classiques, même s'ils sont calculés sur les deux images, ne donnent pas la même discrimination.

La matrice de confusion calculée entre notre classification et l'ensemble des zones de photos interprètes sur l'image ENVISAT donne seulement un taux de 5 % de fausse reconnaissance. En d'autres termes, elle offre un taux de 95% de bonne classification.

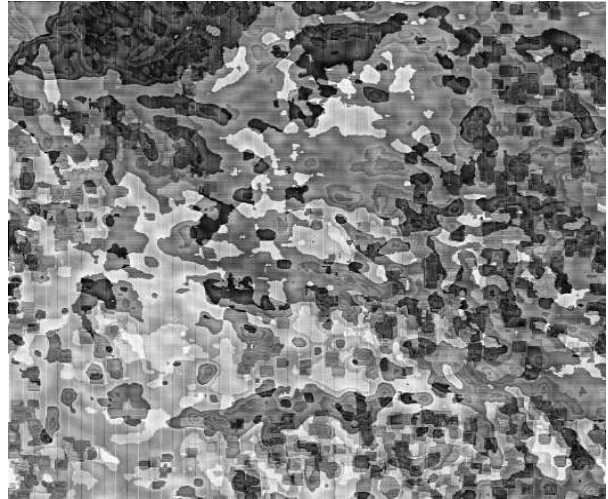
5.6.4 Évaluation

L'approche a atteint son objectif : nous avons réussi dans des régions exigeantes avec ses dunes, ses roches et le sol dur. Cette technique de corrélation fournit des résultats fiables sur le Tibesti et nous permet de travailler pour les prochaines phases : la recherche pour le déplacement des dunes et la recherche de changements locaux dans les autres types de zones dans le désert. L'inconvénient majeur de cette technique est dû au fait que :

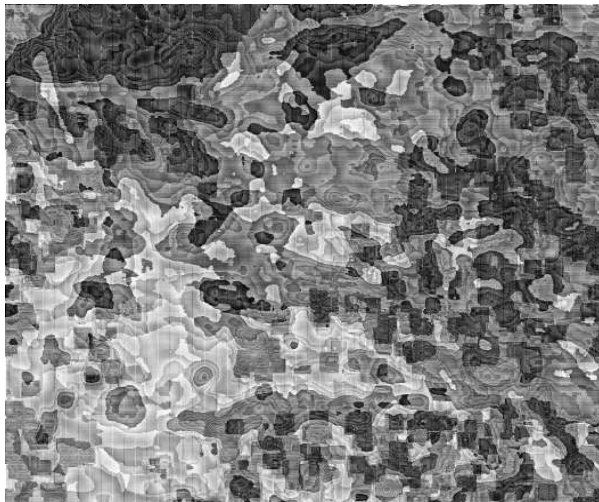
- ◇ deux images satellites sont nécessaires et
- ◇ les dates d'acquisition de ces deux données doivent être suffisamment distantes, ce qui n'est



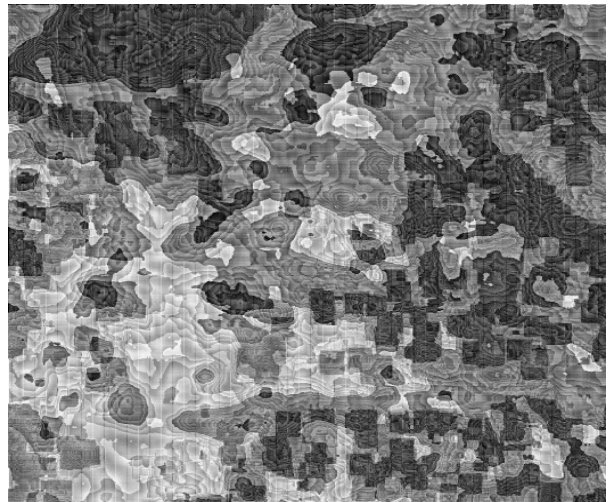
(a) Fenêtre de 5x5 pixels



(b) Fenêtre de 10x10 pixels

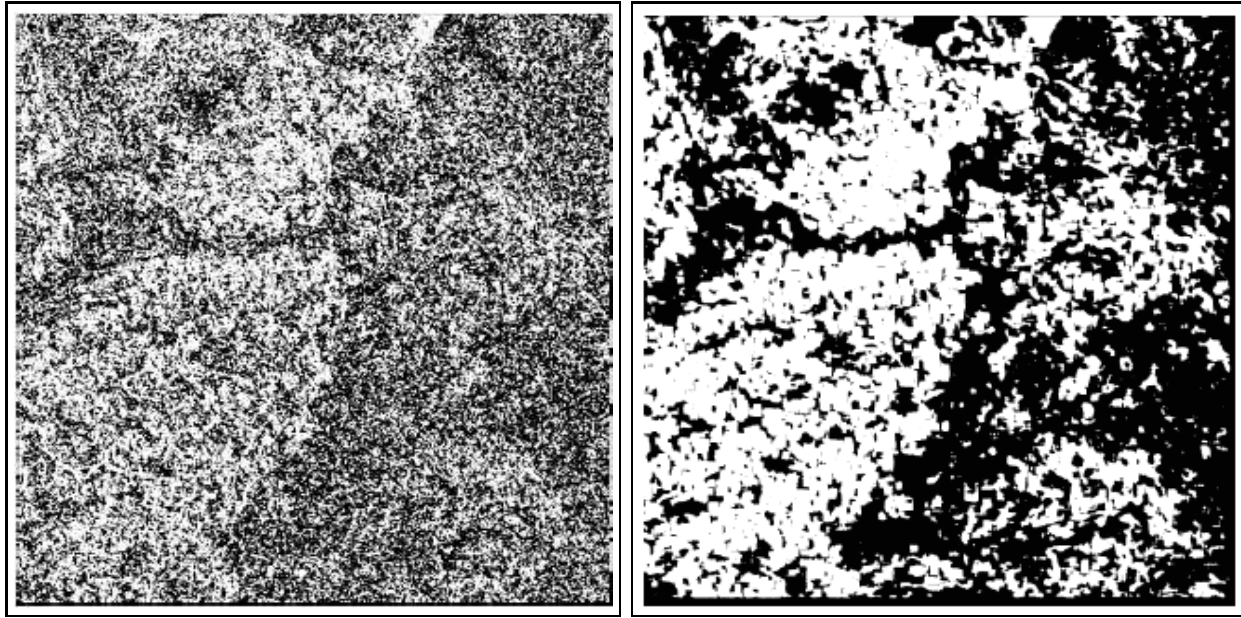


(c) Fenêtre de 15x15 pixels



(d) Fenêtre de 20x20 pixels

FIG. 5.30: Corrélation entre les deux images de la figure 5.29 pour différentes tailles de fenêtre



(a) Markovienne sur des indices classiques

(b) Avec la corrélation de FIG. 5.30

FIG. 5.31: Même classification pour les deux images

pas toujours réalisable.

En fonction de l'objectif de l'étude : recherche de personnes perdues, déplacement sur une courte période après une tempête sur une zone locale par exemple.

La prochaine phase de notre étude sera l'introduction d'un modèle de paysage stochastique combiné avec simulation de l'image pour éviter d'avoir besoin une seconde image pour notre approche. Cette simulation sera calculée suivant une carte boussole des modèles météorologiques. En outre, nous tenons également à étudier l'association des images RSO avec des images optiques pour rendre plausible et fiable notre détection.

5.7 Recherche des variations de formes par shape from shading

Les résultats précédents nous montrent qu'une fois les points brillants détectés les zones de dunes répondent de façon standard aux signaux radar et que les signaux mesurés suivent les pentes montantes et descendantes. En effet, les dunes sont constituées de sable et par conséquent, elles ne sont différenciées que par leur forme. Cela nous impose donc de trouver une méthode permettant de déterminer la forme des dunes pour pouvoir caractériser leur changement.

Nous savons en outre que le système ASAR ENVISAT, à l'incidence où nous employons n'a que peu de chance de générer des layovers dans les zones de dunes. Il est donc possible d'envisager de comparer des pseudo reconstructions de relief à partir des variations de l'intensité des signaux issus des dunes perçues par le radar. Cette approche est souvent appelée radarclinométrie. Notre travail diffère ici de celle-ci par le fait que nous cherchons plus à caractériser les formes du terrain visé que de calculer des altitudes précises.

Les travaux présentés dans [73] montrent que la radarclinométrie permet une bonne caractérisation des dunes mais à condition de disposer de données SAR acquises avec une incidence convenable, c'est-à-dire suffisamment verticale pour que les recouvrements et réflexions spéculaires ne se manifestent pas. Les données sur notre zone d'intérêt étant rares, il nous faut utiliser une méthode permettant de déterminer cette forme sans disposer d'image parfaitement adaptée ce qui explique que nous ne cherchons pas à déterminer précisément l'altitude.

Dans un premier temps, et dans un souci de faire un bref rappel, nous faisons une présentation sommaire portant sur la clinométrie. Ensuite, nous situons, les limites de cette méthode, dans le cadre de notre travail de thèse. Enfin, nous terminons cette section, par une comparaison des courbes clinométriques résultantes de nos différents codages. Et, ceci dans le but d'identifier le changement intervenu entre deux prises de vue de la même scène.

5.7.1 Radarclinométrie adaptée à notre problème

La radarclinométrie est une méthode de "shape from shading" appliquée aux images SAR [74]. Il permet en théorie de calculer l'altitude de n'importe quel pixel d'une image SAR à partir de cette unique image. Elle est basée sur le fait que la rétrodiffusion est une fonction de la surface de la cellule de résolution du pixel et que celle-ci est dépendante de l'angle entre le faisceau radar et la normale locale du terrain. Dans le cas d'une réflexion Lambertienne on écrit :

$$I(x, y) = \delta S(x, y) \cos(\alpha - \beta(x, y))$$

Où α est l'angle entre la normale du terrain et la direction de visée du radar δ le coefficient de rétrodiffusion lié au terrain, et $S(x, y)$ est la surface de terrain interceptée par le pixel. Cette dernière dépend également de l'angle entre le faisceau radar et la normale au terrain.

La surface S a une expression compliquée telle que nous pouvons la trouver dans [15] :

$$S(x, y) = \frac{\sin(\alpha) \cos^2(\alpha - \beta(x, y))}{\cos^2(\alpha) \sin(\alpha - \beta(x, y))}$$

soit :

$$I(x, y) = \delta \frac{\sin(\alpha) \cos^3(\alpha - \beta(x, y))}{\cos^2(\alpha) \sin(\alpha - \beta(x, y))}$$

Ce schéma permet de voir que l'intensité des images dépende de la pente locale mais montre aussi que si l'angle β est petit un certain nombre d'approximations sont possibles. En effet, dans ce cas, l'expression de $I(x, y)$ devient quasi linéaire [15]. En outre, si nous connaissons une approximation de la valeur du sol plat il est possible de supprimer le terme δ si nous le supposons constant. Comme nos zones sont constituées in fine que de grains de sable identiques, cette hypothèse est facile à vérifier.

Avec toute ses approximations il est possible d'écrire que :

$$\frac{dz}{dx}(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0}$$

où x, y sont les coordonnées du pixel et α une fonction de la nature du terrain, et $I(x, y)$ l'intensité de l'image.

En théorie, il est donc possible d'obtenir une approximation de l'altitude des pixels par une simple sommation des valeurs de I sur une ligne à condition de connaître la valeur du sol plat.

Ce modèle suppose par contre qu'il n'y a pas de très forte rétrodiffusion liée à des effets cumulatifs tels que nous les avons constaté infra. Hors, comme dans notre zone il y en beaucoup, il faut cependant utiliser un modèle de rétrodiffusion apte à absorber les très fortes intensités dues aux faces d'orientation favorables des dunes. De tels modèles sont décrits dans [75] mais après quelques essais nous avons adopté une stratégie légèrement différente. En effet, plus le modèle est raffiné, plus il a de mal à s'adapter au non respect de certaines de ses hypothèses et en pratique, les choses sont un peu plus compliquées que cela.

Ceci en particulier parce que la valeur de I est bruitée par le speckle et que l'angle de la normale locale de la surface des dunes peut dépasser l'angle d'incidence du faisceau radar et donc conduire à des aberrations dans ce calcul. Par exemple, si on utilise des images ENVISAT ASAR, leur angle d'incidence est compris entre 15 et 45 degrés et peut dépasser la pente des dunes si la visée est dirigée vers le côté du vent de la dune. Dans ce cas, les hypothèses ne sont plus réunies et la valeur d'altitude calculée est fausse. Ceci pose un problème évident si on cherche à déterminer une altitude car cette valeur fausse se propage en plus le long de la ligne de l'image. Cela complique de simples comparaisons de profil si l'on fait cela sur toute la ligne mais n'est pas très gênant quand on cherche à caractériser un phénomène local comme le déplacement d'une dune s'étendant sur une vingtaine de pixels.

Nous avons donc adopté une stratégie qui consiste à calculer la valeur de Z sur une petite zone centrée autour d'un pixel et à évaluer les différences en Z sur cette zone en considérant que la valeur obtenue au centre est la même. Afin d'augmenter la fiabilité de nos calculs, nous introduisons des seuils sur l'intensité permettant de limiter l'effet des potentiels zones d'ombres et des surfaces dont la normale est exactement dans la direction du radar. Ces deux seuils sont choisis automatiquement à partir de la valeur moyenne et de la variance de la zone qui entoure le pixel. Pratiquement, nous calculons, pour chaque pixel de deux images, la valeur :

$$Z'_x(y) = \sum_{i=-n}^n V(I(x-i, y), I_0) \quad (5.13)$$

où Z' est une pseudo valeur d'altitude, I l'intensité de l'image et I_0 l'intensité réfléchie par le

sol plat. Nous comparons ensuite les valeurs obtenues sur deux images en calculant un cumul de différence pondéré par la distance au centre le long du profil. Cette approche s'est révélée encore trop bruitée, nous l'avons donc étendue en calculant Z'' comme une valeur pondérée de Z' sur plusieurs lignes. Avec une largeur de 2 lignes au dessus et en dessous du pixel, nous obtenons de très bons résultats mais nous pensons que cela est dû à l'orientation moyenne des crêtes des dunes de notre zone d'étude qui est du nord-est au sud-ouest.

Après divers essais, il est apparu que les coefficients de pondération en ligne sont choisis suivant la théorie des fenêtres de Pearson et suivant une exponentielle décroissante en colonne. Afin de ne traiter que les zones de dunes, nous appliquons le prétraitement décrit dans le chapitre précédent.

5.7.2 Mise en oeuvre pratique

La mise en oeuvre pratique demande de résoudre quelques problèmes simples :

- Il faut trouver une valeur de sol plat

Si nous considérons des champs de dunes, ils sont en moyenne de même pente que le socle cristallin sur lequel ils reposent. L'utilisation de l'équation (5.13) montre que l'altitude moyenne correspond en fait à la radiométrie moyenne de la zone à condition que le modèle de rétrodiffusion choisi puisse être appliqué partout. Hors dans notre cas nous avons deux types de rétrodiffusions et nous avons choisi un modèle qui délaisse les pixels résultats de réflexion spéculaire. Il est donc nécessaire de calculer cette moyenne en excluant les points brillants tel que défini dans la partie 5.5.

- Si nous souhaitons comparer des profils il faut avoir une référence commune

Pour cela nous allons travailler sur des images préalablement recalées à l'aide des points d'amer pris sur des zones donc nous sommes sûrs qu'ils ne se déplacent pas dans le temps. En pratique ces points sont choisis sur des roches visibles dans les images.

Cela correspond donc à la chaîne de traitement, suivante qui résume les étapes pouvant nous conduire aux différentes images et courbes :

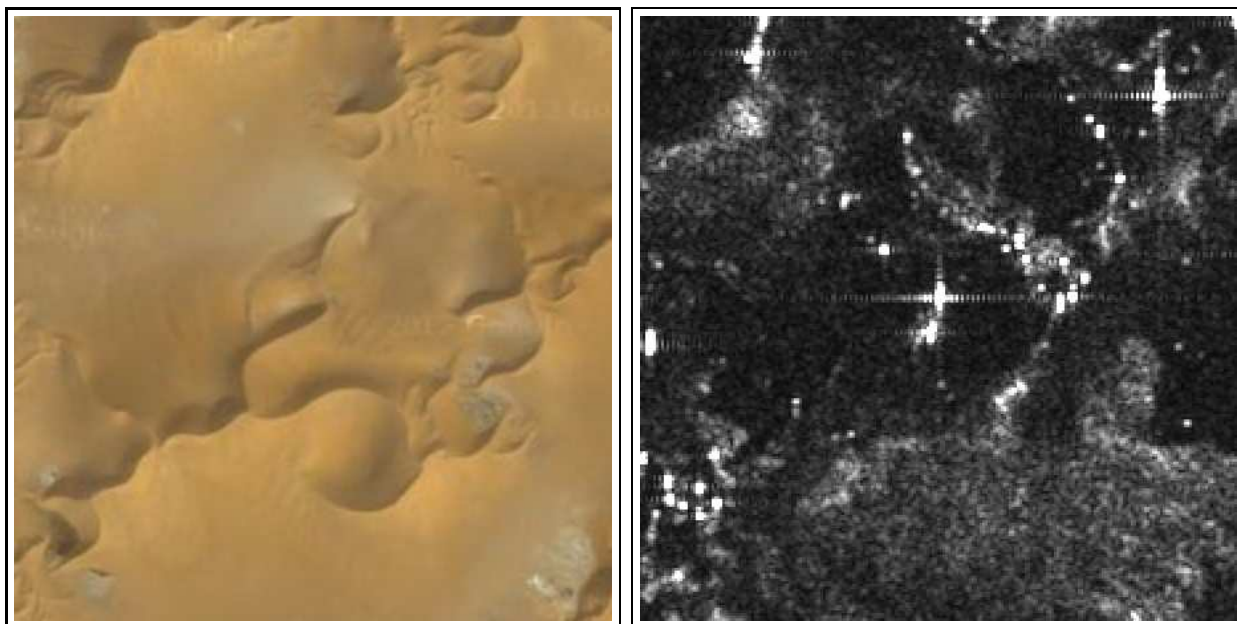
1. acquisition de deux images,
2. recalage de l'image fixe I_F par rapport à l'image déformable I_M ,
3. calcul des Z correspondantes aux deux images de l'étape 2,
4. on génère les tables de données correspondantes aux résultats de 3,
5. enfin, on passe à la représentation mode courbe de 4 et visualisation de 3.

Nos calculs sont réalisés sur des zones où les dunes ont des pentes raisonnables et où il y a peu de chance de rencontrer des ombres ou des layovers qui s'écarteraient des hypothèses de la méthode. Un exemple d'un tel type de zone est montré sur la figure 5.32.

Les résultats de cette chaîne sont repris dans la partie suivante. Il faut souligner que les images de la figure FIG. 5.33 à la figure FIG. 5.37 ont la même dimension (2048,2048) pixels où I_1 représente l'image acquise en 2004 et I_2 celle de 2006.

5.7.3 Résultats

Sur la figure 5.33 nous présentons des extraits de 2048x2048 pixels de deux images ENVISAT acquises en juin 2004 et novembre 2006 superposées via un modèle de recalage polynomial utilisant des points d'amer. Sur ces images à 30 mètres de résolution, nous distinguons différentes zones de dunes mélangées, séparées par des zones de sol dur.



(a) Image Google Map de dunes

(b) Image Envisat d'une zone de désert

FIG. 5.32: Image optique et image Envisat de dunes au Tchad

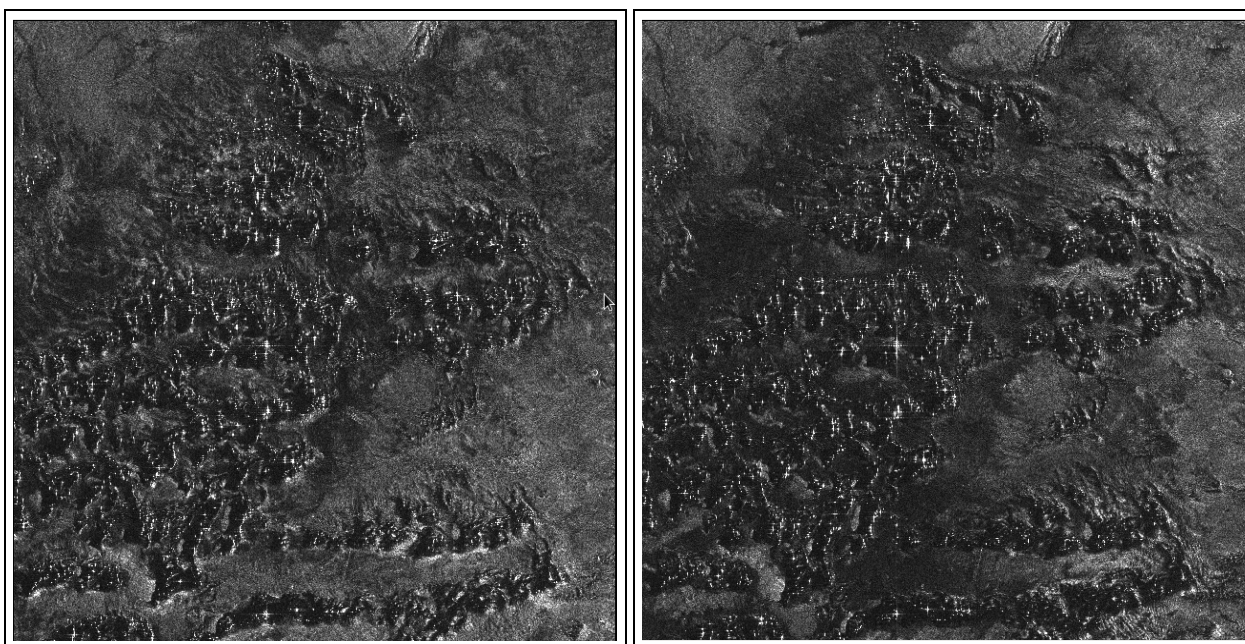
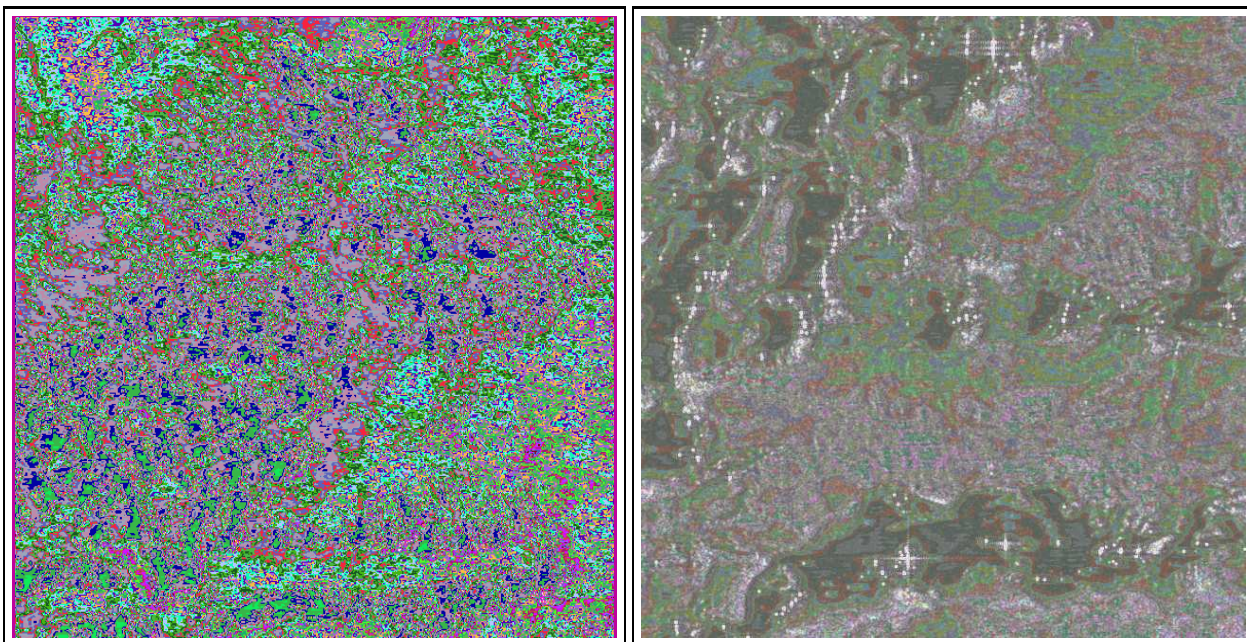
(a) Image I_1 , 2004(b) Image I_2 , 2006

FIG. 5.33: Exemple d'images ASAR ENVISAT du Tibesti au nord ouest de Faya Largeau



(a) Différences d'altitude constatées avec les images (b) Image de résultats incrustée sur l'image de 2004 de FIG. 5.33

FIG. 5.34: Exemple de notre traitement pour des images ASAR ENVISAT, images du Tibesti

Ces images nous montrent très clairement qu'il n'est pas possible de distinguer les deux types de zone en se basant sur les pixels brillants mais aussi que les statistiques classiques ne sont pas discriminantes pour les deux classes qui nous intéressent. Cela confirme bien que nous devons chercher les mouvements via des critères de forme [76].

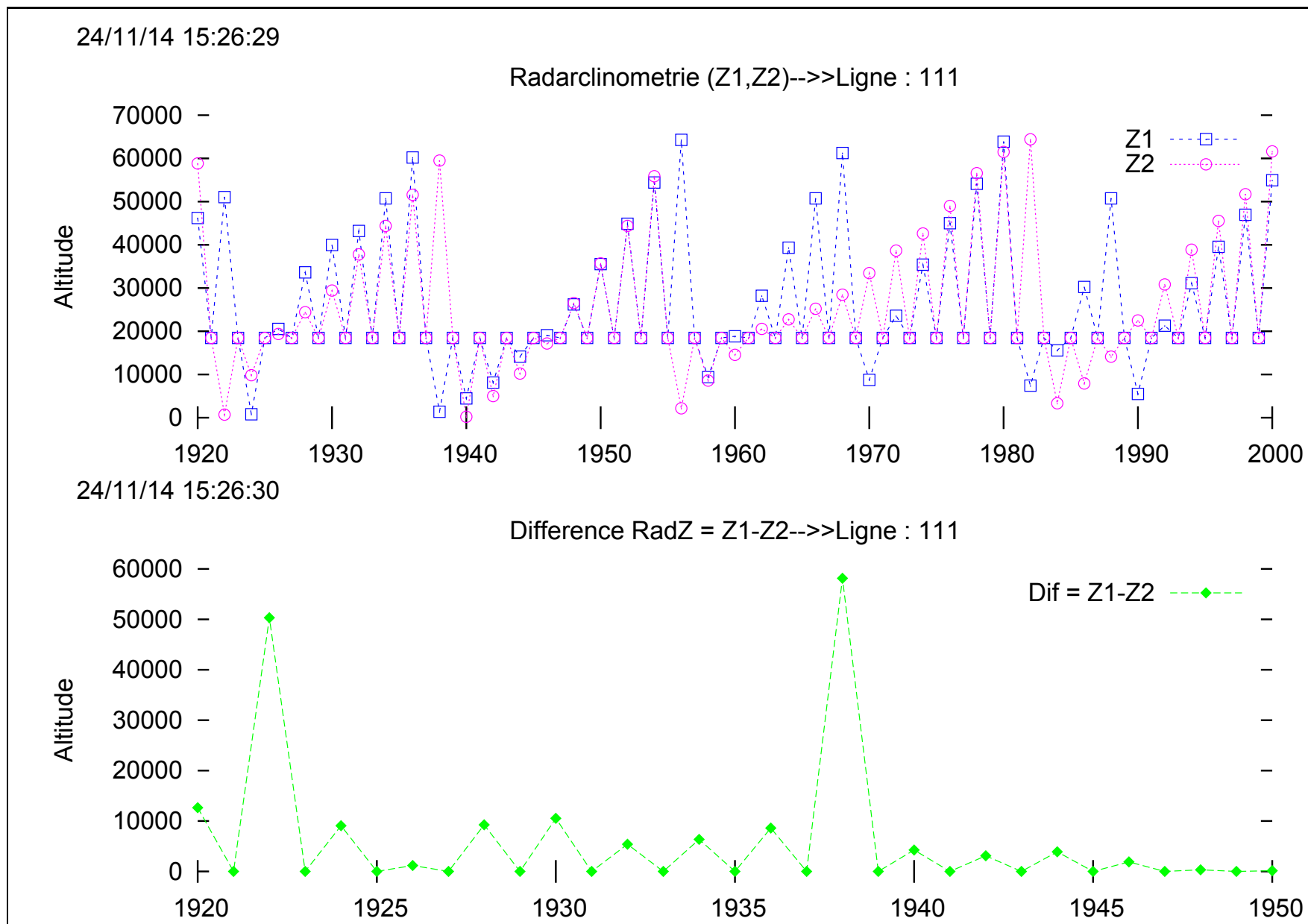


FIG. 5.35: Exemple de notre traitement dans le désert du Tibesti au Tchad appliqué à des images ASAR ENVISAT. En haut, le profil d'une ligne extraite de l'image de la FIG. 5.33, en bas, le résultat du traitement sur la ligne Z'' .

Les résultats de notre traitement pour les images de la figure 5.33 sont montrés sur la figure 5.34. Ces résultats nous permettent de voir des déplacements uniformes dans les zones de dunes, ce qui montre que la méthode est efficace. Les déplacements dans les zones de roche sont extrêmement bruités car ils sont dus à une fausse interprétation des zones de speckle par notre méthode. Ce n'est pas un problème dans la mesure où nous pouvons les masquer via notre méthode de classification de zone de dunes [6]. Nous remarquons aussi que les valeurs particulièrement élevées ne sont pas un obstacle car elles ne génèrent pas d'artefact particulier par suite du traitement de plusieurs ligne comme cela est exposé infra.

Afin de se faire une idée plus précise de l'efficacité de cette méthode, nous pouvons observer les profils tels que celui de la figure 5.35. Sur celui-ci, nous voyons à gauche une zone de dunes et à droite une zone protégée. Cela donne des informations cohérentes avec la photo-interprétation des deux images le long de ce profil. Plus globalement, nous remarquons que notre méthode indique des déplacements d'autant plus importants que le fetch de nord-est est grand. Ceci correspond aux grandes lois de déplacements des dunes de sable dans notre type de zone. En dégradant la résolution de nos images, nous avons réalisé des tests à diverses échelles et il apparaît qu'il ne faut pas que les images aient une résolution trop inférieure à 30 mètres si l'on souhaite conserver une bonne sensibilité aux résultats.

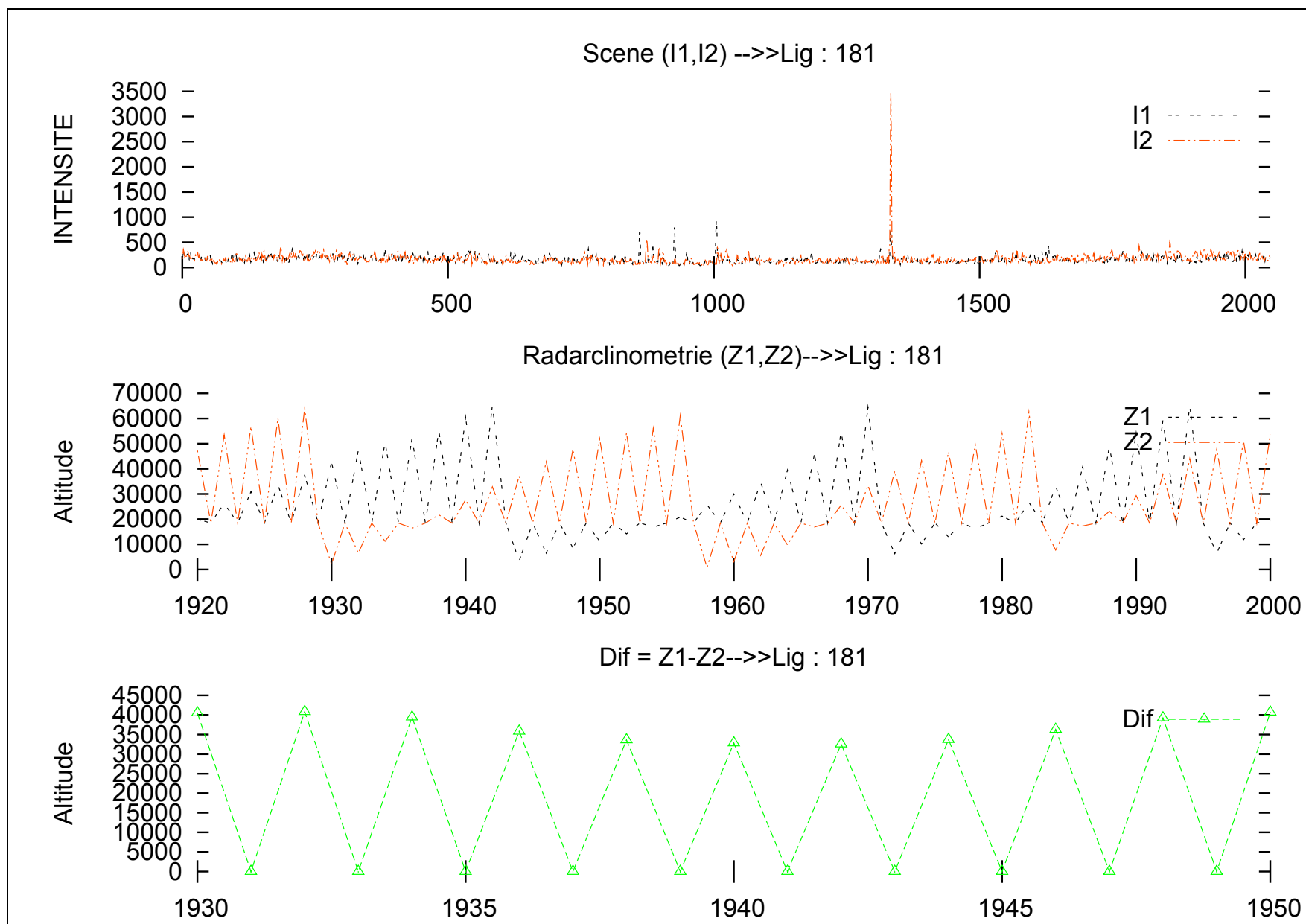


FIG. 5.36: Superposition des courbes issues de tables des données/radarclinométrie

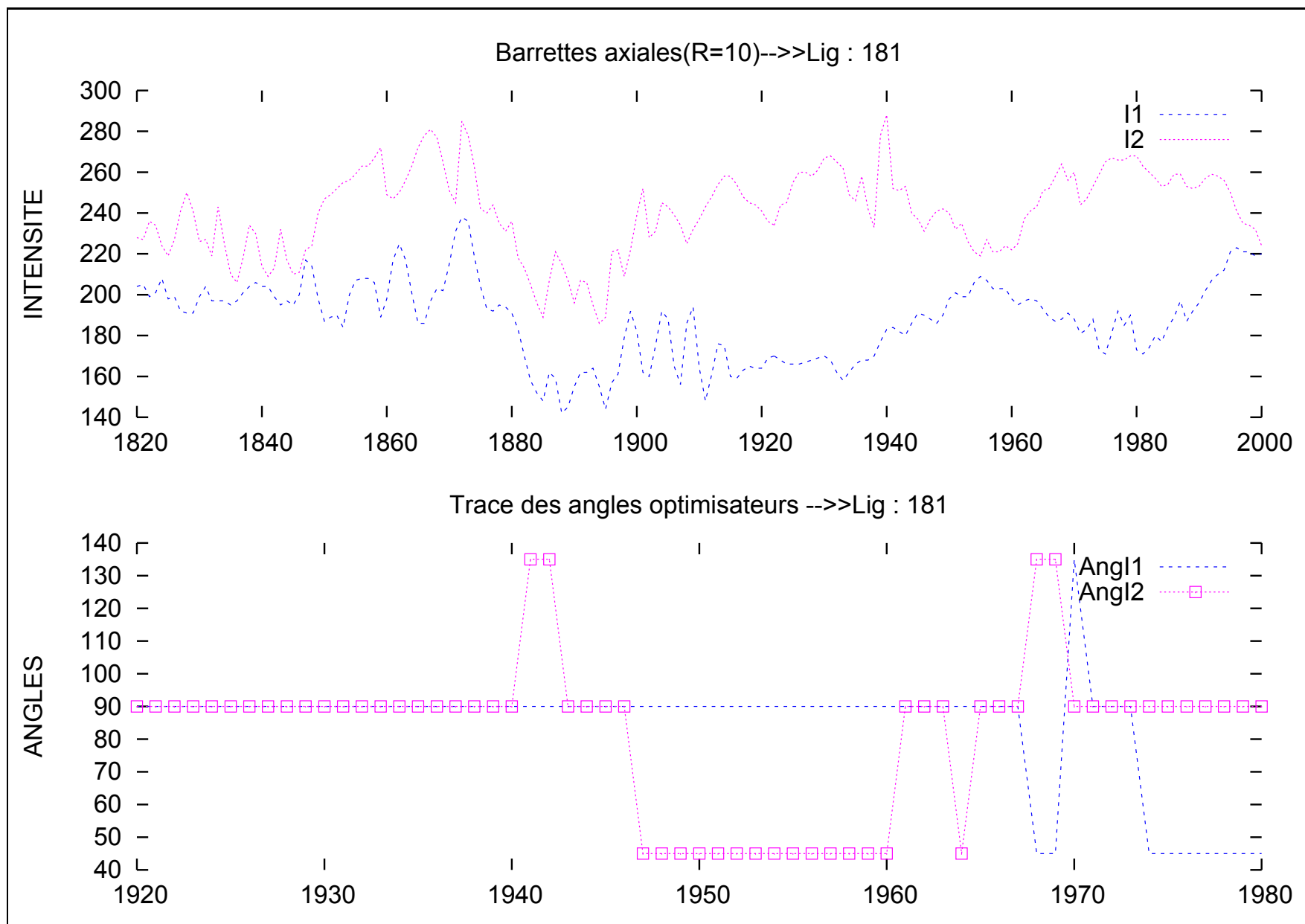


FIG. 5.37: Superposition des courbes issues de tables des données/angles optimiseurs

5.7.4 Évaluations

Ces résultats montrent que l'utilisation de la forme extraite à partir de l'éclairage et de technique proche de la clinométrie, en particulier celle reposant sur la radarclinométrie au travers de profils est intéressante. Elle renseigne sur le type de changement intervenu en zone dunaire. À ce propos, on arrive des fois à mettre en évidence certains changements ponctuels. Il s'agit en fait de décalage de dunes au cours du temps. Pour ce qui est de mouvement de dunes, cela peut se traduire par une superposition des courbes avec un facteur d'écart, qui n'est pas fonction du déplacement. En partie, cela peut se justifier, par la présence de speckle dans toute l'image SAR et quelques erreurs d'arrondies.

Cependant, il faut surtout souligner que, si les deux prises de vue de la scène sont suffisamment éloignées, il peut arriver que certaines dunes quittent leur couloir d'origine afin d'intégrer d'autres corridors. Mais pour que de telles situations puissent arriver il faut bien aussi que la zone d'étude soit soumise à de fortes tempêtes dans le temps. Nous pensons que cette technique a une forte potentialité dans des régions homogènes et très peu accidentées.

5.8 Conclusion

Ce chapitre est au coeur de nos travaux. D'une part, nous avons eu à mettre en place différents types de codages, basant sur un voisinage carré, linéaire, axial et circulaire mais aussi sur de profils radarclinométriques. D'autre part, de nouveaux concepts ont été introduits, notamment ceux de barrettes : axiales & circulaires. Ils donnent naissance l'approche naïve & approche innovante ; qui optimise au passage l'algorithme de Michener. La quasi totalité des ces traitements atténue l'effet de speckle et les phénomènes dus aux distorsions géométriques.

Par ailleurs, l'expérimentation via les profils radiométriques essaye de répondre à la complexité d'interprétation ponctuelle des données numériques. L'intérêt de cette démarche n'est pas l'étude d'une région particulière, mais surtout, son caractère original. Nous ne revendiquons nullement proposer la bonne technique, mais plutôt faire part des réflexions auxquelles nous nous sommes confrontées lors des essais d'interprétation des résultats.

Cependant, cette approche de détection de changement par prétraitement ne peut qu'effleurer un domaine de recherche aussi vaste que complexe. Elle donnera l'envie d'en savoir un peu plus. Toutefois, un codage qui considère simultanément la trace des angles simulant la rose de vent et atténuant le chatoiement reste néanmoins d'actualité.

Tableaux

5.1	Voisinage 2D, n=1	108
5.2	Synoptique des barrettes avec n=3	115
5.3	Calcul d'une barrette candidate, avec n=1	116
5.4	Calcul d'une barrette candidate, avec n=2	117
5.5	Effet de la fenêtre sur la corrélation	139

Figures

5.1	Illustration du seuillage simple	105
5.2	Multiseuillage avec deux niveaux	106
5.3	Comparaison des résultats : seuillage/multiseuillage	107
5.4	Voisinage 2D de type carré	111
5.5	Voisinage 1D de type horizontal	111
5.6	Voisinage 1D de type vertical	112
5.7	Voisinage 1D de type diagonal	113
5.8	Voisinage 1D de type diagonale opposée	113
5.9	Comparaison des résultats en 1D & 2D	114
5.10	Synoptique du modèle de traitement	115
5.11	Codage détaillé du module traitant la barrette candidate	118
5.12	Évolution des codages circulaires	119
5.13	Barrettes circulaires avec $n = 1$ et 3	120
5.14	Voisinage optimum 1D de type axial	122
5.15	Voisinage optimum de type circulaire	123
5.16	Comparaison des résultats axial & circulaire	124
5.17	Angles destructeurs de distorsions géométriques	125
5.18	Comparaison d'angles destructeurs de distorsions axial & circulaire	126
5.19	Mise en relief de dunes de sable	127
5.20	Un champ de dunes en imagerie SAR ENVISAT	130
5.21	Coefficient de variation glissant sur l'imagerie SAR ENVISAT	130
5.22	Différence de coefficient de variation glissant entre 2004 et 2006	131
5.23	Points brillants sur un champ de dunes	133
5.24	Détection des points brillants sur un champ de dunes	134
5.25	Incrustation des points brillants sur l'image de 2004	135
5.26	Zoom d'incrustation des points brillants sur un extrait de l'image de 2004	136
5.27	Courbes issues de tables des données/Covariance	142
5.28	Courbes issues de tables des données/angles optimiseurs-covariances	143
5.29	Images de Tibesti	144
5.30	Corrélation entre les deux images de FIG. 5.29 pour différentes tailles	145
5.31	Même classification pour les deux images	146
5.32	Image optique et image Envisat de dunes au Tchad	150
5.33	Exemple d'images ASAR ENVISAT du Tibesti	150
5.34	Exemple de notre traitement pour des images ASAR ENVISAT	151
5.35	Profil d'une ligne extraite et résultat du traitement sur la ligne Z''	152
5.36	Superposition des courbes issues de tables des données/radarclinométrie	154
5.37	Superposition des courbes issues de tables des données/angles optimiseurs	155

Conclusion générale

Après avoir recensé quelques informations capitales, relatives aux images satellites SAR, aux méthodes de comparaison d'image et aux techniques de détection de changement, nous avons ensuite expliqué les phénomènes inhérents aux images satellites et décrit les travaux réalisés à partir d'images SAR dans le désert. Nous avons pris en compte ces considérations structurelles et avons défini des nouvelles techniques de détection de changement dunaire adaptées à ce cadre. De même, nous avons proposé une méthode de représentation de connaissance basée sur des profils radiométriques. Elle exhibe l'information suivant une plage dynamique de données, à l'échelle humaine. Nous avons réalisé de nombreux tests et ce, à chaque nouvelle technique élaborée. Dans ce chapitre, nous allons donner un résumé de nos différentes approches concernant chacun de ses points. Des perspectives de cette thèse seront données pour clore ce travail.

Sommaire

6.1 Occupation des sols et caractérisation	159
6.2 Méthodes proposées	160
6.3 Commentaires des résultats	161
6.4 Perspectives et conclusion	162

Ce chapitre récapitulatif est organisé comme suit. La section 6.1 situe les enjeux d'occupation des sols, indispensables aux codages qui en résultent. La section 6.2 résume les méthodes élaborées pendant la thèse en insistant sommairement sur celles qui sont indispensables. La section 6.3 commente les résultats de la thèse en restituant les informations obtenues par les techniques choisies et ouvre une petite discussion sur les méthodes déployées et le comportement de certains codages. Pour finir, la section 6.4 présente le travail à venir à travers des perspectives à court, moyen et long terme.

6.1 Occupation des sols et caractérisation

Nous rappelons ici très brièvement, les enjeux de la morphologie des sites concernés par l'étude, nécessaires dans la chaîne de traitement pendant la phase d'élaboration des techniques adéquates que nous avons eu à proposer.

L'avancée du désert avait entraîné de profonds changements dans l'espace de Tibesti. Il a été

affecté par des mutations brusques dues au rétrécissement des oasis suite au changement climatique, mais aussi par des modifications des surfaces provoquées par les tempêtes de sable. L'évolution de changements des sols a été cartographiée à partir du traitement de deux images satellitaires à haute résolution spatiale. Le but recherché était de montrer les changements dus au déplacement des dunes, tout en déterminant les grandes catégories d'occupation des sols au dépens desquelles elles s'étaient produites.

Les images ont été classées selon une manière simpliste. Elles ont été séparées en objets homogènes à deux niveaux hiérarchiquement imbriqués.

À Niveaux 1 : présence des franges brillantes suivant l'apparition des roches, ou des rares maisons/engins détruits ; souvent plus fins.

Niveaux 2 : plus grossier. À première vue, il est très difficile de détecter quoi que ce soit. Cependant, en regardant avec plus d'attention et de sérénité, on arrive à distinguer les régions semi-arides des zones dunaires.

Ensuite, les images segmentées ont été regroupées différemment à chaque niveau de séparation : les objets de l'image de niveaux 1 ne bougent pas beaucoup, car ils sont formés autour des pierres et des roches caillouteuses [77]. Cependant, les objets de niveaux 2 ne sont pas discernables à travers un zoom grossier à cause de leur ressemblance.

6.2 Méthodes proposées

Les travaux de cette thèse ont été focalisés essentiellement sur de nouvelles propositions d'approches de détection de changement dunaire en milieu désertique. Ces approches ont porté sur le traitement d'images satellites. Elles reposent sur des estimations statistiques des valeurs radiométriques en intégrant la morphologie de la région d'étude. Ces techniques sont évaluées sur un jeu d'images test provenant de satellites ENVISAT.

Plusieurs techniques de comparaison d'image existent dans la littérature. Néanmoins, à notre connaissance, rares, sont celles qui prennent en compte à la fois l'aspect filtrage du phénomène de speckle et la distorsion géométrique due à l'angle d'incidence du capteur et la pente du relief de la zone imagée. C'est ainsi que dans cette thèse, nous avons eu à proposer, notamment au chapitre 5, différentes approches de détection de changement dunaire ; réconciliant au mieux le phénomène de speckle et celui de la distorsion géométrique. Ces différentes techniques de détection automatique de changement, mises en oeuvre ont fait l'objet de publications et communications internationales.

Nous allons examiner les avantages et inconvénients des différentes techniques élaborées, cf. chapitres 4 et 5, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus sur des images réelles.

En effet, le chapitre 4 a essentiellement visé les caractéristiques intéressantes sur lesquelles la détection peut s'appuyer. Deux types de transformation ont porté leur fruit. Il s'agit des transformations pixelisée et localisée. D'ailleurs bon nombre de techniques élaborées sont fondées sur le type localisé. La transformation globalisée n'est pas très intéressante dans le cadre de ce travail, vu qu'en général la zone d'étude n'est pas très homogène. Ce type de transformation induit nécessairement des erreurs grossières lors de traitement/interprétation. Cependant, les transformations utilisant la transformée de Fourier et la distance de Prasanta Mahalanobis paraissent fournir des pistes intéressantes.

Par la suite, au chapitre 5, globalement, nous avons proposé et testé cinq méthodes. Elles utilisent toutes des transformations localisées, exceptée celle reposant sur le seuillage. Pour tout dire, celles utilisant les barrettes axiales, circulaires et radarclinométriques semblent meilleures que

la méthode du seillage et celle du voisinage moyen carré. Une technique basée sur la rose du vent et fondée sur les angles d'incidences optimiseurs théoriques est aussi élaborée. Le vrai problème dans cette expérimentation par prétraitement, c'est celui du choix de rayon de voisinage. Plusieurs tests s'imposent pour trouver le bon rayon. Généralement, il est en deça de 100.

Une dernière vague de techniques élaborées, celle qui emploie la détection conjointe d'éléments désertiques sur images SAR. La radarclinométrie avait permis dans certaines mesures de mettre en évidence le dépalcement de dunes de sable à partir d'images SAR.

6.3 Commentaires des résultats

Les dunes de sable s'étendent selon la direction dans laquelle le vent souffle [2] & [5]. Les sur-détections ou les sous-détections de changements proviennent d'une accumulation d'erreurs dans la chaîne de traitements appliqués aux images. Les conditions d'acquisitions ont une influence sur la qualité du résultat [3]. La part d'accumulation d'erreurs provenant des techniques de prétraitement n'est pas à négliger. Néanmoins, elle peut être atténuée grâce aux nouvelles techniques originales que nous avons élaborées.

Tous les résultats que nous avons obtenus pendant cette thèse, avec ou sans prétraitement découlent de trois grands types d'approches. En l'occurrence, il s'agit de :

¶ Comparaison directe

Elle est simple d'utilisation. Cependant, elle semble ne pas être très adaptée à ce type d'étude. En général, les images ne sont pas directement superposables. En procédant de la sorte, dans la plupart des cas, on risque de comparer dès le départ, des endroits totalement différents. Cela induit implicitement de fausses informations.

En dépit de tout cela, il faut d'abord penser corriger les bruits et les distorsions géométriques inhérents aux images satellites afin de pouvoir atténuer les parasites et ce, avant toute pseudo interprétation.

Comparaison après prétraitement

Les résultats obtenus pendant cette phase sont souvent prometteurs. Cela s'explique d'une part par le fait que les bruits ainsi que la distorsion géométrique sont considérés lors du traitement. D'autre part, la prise en compte de la morphologie du terrain lors de l'élaboration des techniques en s'appuyant sur les concepts des *roses des vents*, semble porter ses fruits.

- (a) Cependant, il faut souligner que la plupart des algorithmes de prétraitement, notamment ceux reposant sur les barrettes ont dû subir une amélioration considérable. L'algorithme de **Bresenham** et celui de **Michener** ont dû connaître une profonde amélioration. En particulier, l'approche optimisée par barrettes circulaires que nous avons proposé, nous fait gagner 85% de temps de calculs par rapport à l'application classique de l'algorithme de **Michener** en imagerie radar. Le levier sur lequel nous avons manié, porte sur l'organisation du processus de traitement.
- (b) La détection par points brillants est intéressante. Elle met en lumière les dunes co-détectées sur les deux images de la même scène et particulièrement celles détectées uniquement sur une période. En outre, l'image résultante permet de constater le déplacement des pixels brillants dans le sens des couloirs de dunes, soit majoritairement dans le sens de l'alizé. Nous remarquons aussi que certains points disparaissent ou ap-

paraissent sans qu'il soit possible de dire s'il s'agit de zone d'un effet lié au changement léger de prise de vue ou à un changement.

- (c) Par ailleurs, la détection conjointe via le concept de corrélation a montré son potentiel en permettant de séparer les zones rocheuses avec celles de dunes.
- (d) Enfin, la technique reposant sur les variations de formes par "shape from shading", appelée radarclinométrie a donné des résultats satisfaisants et prometteurs.

Elle avait permis de mettre en évidence la détection des changements naturels (disparition d'une barkhane, décalage d'une barkhane) subit par une scène observée à partir de deux images de la même scène prises en deux dates distinctes.

Par profils radiométriques

La méthode de détection de changement dunaire par profils radiométriques à partir d'images SAR repose sur une table. Cette table porte le nom de **table de données graphiques**, cf. chapitre 4. La construction de cette dernière se fait à travers la génération des données graphiques. Cette génération est issue d'un traitement lié à un codage spécifique des images. Ces images sources, peuvent être multirates ou multisources optiques et radars.

6.4 Perspectives et conclusion

6.4.1 Perspectives

Les perspectives de continuation de cette thèse sont multiples. Nous en donnons quelques unes, en particulier à moyen et long terme.

¶ À court et moyen terme

Conformément à la "détection conjointe" présentée au chapitre 5 de cette thèse, nous pensons qu'il serait souhaitable d'envisager une combinaison de la détection conjointe avec celle de *Prasanta Mahalanobis*. Cette dernière semble fournir à premier abord, une information globale pour une donnée en entrée, prise séparément. Toutefois, l'exploration de cette voie est à utiliser avec parcimonie. Il nous semble en effet, que la technique de Mahalanobis serait un atout majeur aux techniques du chapitre 5.

À long terme

- (a) Un des problèmes qui reste à résoudre reste celui de fournir une technique permettant de prévoir l'évolution d'une dune à partir d'une unique scène.
- (b) Nous comptons évaluer la robustesse et la précision de radarclinométrie. À cet effet, nous pensons que l'approche par simulation combinée à la technique de chaîne de Markov puisse apporter quelques éléments de réponses.

6.4.2 Conclusion

La possibilité de fournir des mesures tout le temps justifie largement l'effort consenti dans l'utilisation de l'imagerie radar. Néanmoins, celle-ci pose un certain nombre de soucis, notamment celui :

- ◇ de chatolement,

- ◇ d'interprétation,
- ◇ et de choix de la méthode

qu'il faut considérer pendant le processus de traitement et d'interprétation.

Nous nous sommes imposés dans ce travail de ne pas perdre de vue ; dès le début ; l'aspect chatoiement et la distorsion géométrique inhérents aux images de la télédétection. Nous avons essayé dans la mesure du possible ; à chaque fois que nécessaire ; de définir nos méthodes de façon formelle afin d'en assurer la robustesse. Nous nous sommes également attachés à employer des techniques qui sont simples à comprendre, même si des fois leurs codages nécessitent un investissement humain considérable.

Une analyse pertinente du comportement des différents graphes et l'observation sereine des images résultats obtenus par prétraitement, nous permettent certainement de conclure sur des éventuelles améliorations possibles. D'ailleurs, à ce propos, on peut même penser qu'une connaissance préalable du milieu facilitera la conception des méthodes optimales, fiables et adéquates pour des éventuels types de changements.

Table des figures

1.1	Carte de localisation du Tibesti	3
1.2	Carte géomorphologique d'une partie du Tibesti [2]	4
2.1	Acquisition de l'information par télédétection	13
2.2	Structure d'une onde électromagnétique	13
2.3	Spectre électromagnétique & Bandes d'hyperfréquences les plus utilisées	14
2.4	Plates-formes d'acquisition des données de la télédétection	16
2.5	Trajectoire et couloir-couvert d'un satellite	16
2.6	Résolution spatiale et taille pixel	18
2.7	Déformation géométrique % conditions d'acquisition RADAR	24
2.8	Dunes de sable dans le désert	26
2.9	La saltation	28
2.10	Influence de la gravité sur des saltons & reptons	29
2.11	Une barkhane dans le désert	30
2.12	Vent soufflant sur une dune	31
2.13	Longueur d'écrantage & une mega-dune [24]	33
2.14	Image optique & une représentation du profil	34
2.15	Aéroport Charles de Gaulle & image Envisat d'une zone de désert	37
3.1	Carte du désert du Tibesti extrait de Google map, centre du site	52
3.2	Image du désert du Tibesti extrait de Google map	53
3.3	Désert du Tibesti/partie la plus dense de la ville de Zouar	54
3.4	Image optique de notre zone d'étude/Google map	55
3.5	Images ASAR ENVISAT de notre zone d'étude au sud du massif du Tibesti	57
3.6	Piste sur Image optique traverser de sable (source google)	58
3.7	Piste sur Image ASAR 2004 envisat traverser de sable	58
3.8	Piste sur Image ASAR 2006 envisat traverser de sable	58
3.9	Modèle de rétrodiffusion de dunes en imagerie SAR satellitaire.	61
3.10	Champ de dunes en image optique et SAR	62

3.11	Point brillant d'un Champ de dunes en imagerie SAR ENVISAT	64
3.12	Déplacement de points brillant dans une zone de dunes/(exagéré 10 fois)	66
3.13	Histogramme de zone de différente sorte sur les images de 2004	67
3.14	Histogramme de zone de différente sorte sur les images de 2006	68
3.15	Histogramme de partie de dunes sur les images de 2004.	69
4.1	Construction de f_j : étage de papillon	78
4.2	Schéma complet de l'algorithme temporel de Cooley-Tukey	79
4.3	Schéma complet de l'algorithme fréquentiel de Cooley-Tukey	80
4.4	Construction simplifiée de f_i en 1D	82
4.5	Construction généralisée de f_i en 1D	82
4.6	Codage simplifié de la FFT en 1D	83
4.7	Construction simplifié de f_{ji} en 2D	83
4.8	Construction généralisée de f_{ji} en 2D	84
4.9	Codage simplifié de la FFT en dimesion 2	85
4.10	Fréquence de l'image en ligne	86
4.11	Fréquence de l'image par rapport à la moyenne de Prasanta	86
4.12	Fréquence de l'image par rapport à la moyenne locale de Prasanta	87
4.13	Fréquence par rapport à la à la moyenne de Prasanta à point : ligne	87
4.14	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point majoritaire : ligne	88
4.15	Fréquence de l'image en colonne	89
4.16	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta : colonne	89
4.17	Fréquence par rapport à la moyenne locale de Prasanta : colonne	90
4.18	Fréquence par rapport à la moyenne de Prasanta à point : colonne	90
4.19	Fréquence % à la moyenne de Prasanta à point majoritaire : colonne	91
4.20	Modèle estimant l'évolution de relief	91
4.21	Fréquences des images du Tibesti	92
4.22	Modèle mesurant l'évolution de deux scènes avec un prétraitement	93
4.23	Mesure de l'évolution de deux scènes avec un prétraitement	94
4.24	Modèle calculant l'évolution de scènes avant et après prétraitement	95
4.25	Mesure de l'évolution de scènes avant et après prétraitement	96
4.26	Images de deux sites distincts	99
4.27	Mesure de profils de deux scènes distinctes	101
5.1	Illustration du seuillage simple	105
5.2	Multiseuillage avec deux niveaux	106
5.3	Comparaison des résultats : seuillage/multiseuillage	107
5.4	Voisinage 2D de type carré	111
5.5	Voisinage 1D de type horizontal	111
5.6	Voisinage 1D de type vertical	112

5.7	Voisinage 1D de type diagonal	113
5.8	Voisinage 1D de type diagonale opposée	113
5.9	Comparaison des résultats en 1D & 2D	114
5.10	Synoptique du modèle de traitement	115
5.11	Codage détaillé du module traitant la barrette candidate	118
5.12	Èvolution des codages circulaires	119
5.13	Barrettes circulaires avec $n = 1$ et 3	120
5.14	Voisinage optimum 1D de type axial	122
5.15	Voisinage optimum de type circulaire	123
5.16	Comparaison des résultats axial & circulaire	124
5.17	Angles destructeurs de distorsions géométriques	125
5.18	Comparaison d'angles destructeurs de distorsions axial & circulaire	126
5.19	Mise en relief de dunes de sable	127
5.20	Un champ de dunes en imagerie SAR ENVISAT	130
5.21	Coefficient de variation glissant sur l'imagerie SAR ENVISAT	130
5.22	Différence de coefficient de variation glissant entre 2004 et 2006	131
5.23	Points brillants sur un champ de dunes	133
5.24	Détection des points brillants sur un champ de dunes	134
5.25	Incrustation des points brillants sur l'image de 2004	135
5.26	Zoom d'incrustation des points brillants sur un extrait de l'image de 2004	136
5.27	Courbes issues de tables des données/Covariance	142
5.28	Courbes issues de tables des données/angles optimiseurs-covariances	143
5.29	Images de Tibesti	144
5.30	Corrélation entre les deux images de FIG. 5.29 pour différentes tailles	145
5.31	Même classification pour les deux images	146
5.32	Image optique et image Envisat de dunes au Tchad	150
5.33	Exemple d'images ASAR ENVISAT du Tibesti	150
5.34	Exemple de notre traitement pour des images ASAR ENVISAT	151
5.35	Profil d'une ligne extraite et résultat du traitement sur la ligne Z''	152
5.36	Superposition des courbes issues de tables des données/radarclinométrie	154
5.37	Superposition des courbes issues de tables des données/angles optimiseurs	155

Liste des tableaux

1.1	Information sur le jeu de données	5
2.1	Plates-formes satellitales et leurs principales caractéristiques	20
2.2	Quelques satellites à vocation particulière	21
2.3	Comparaison entre RADARSAT et ENVISAT	24
2.4	Classification des méthodes de changements	43
3.1	Nombre de pixels brillants sur un quadriage régulier	65
3.2	Statistique sur différent type de zones image de 2004	67
3.3	Statistique sur différent type de zones image de 2006.	69
3.4	Statistique de partie de dunes sur les images de 2004.	70
4.1	Exemple de traitement pixel à pixel	74
4.2	Extension de TAB.4.1	74
4.3	Transformation locale vers un pixel	75
4.4	Extension de TAB. 4.3	75
4.5	Transformation en ligne	75
4.6	Extension de TAB. 4.5	76
4.7	Caractérisation de ces trois types de transformations	76
4.8	Paramètres d'images numériques [66]	81
4.9	Modèles verticaux obtenus par transposition	88
4.10	Mesure de profils	98
5.1	Voisinage 2D, n=1	108
5.2	Synoptique des barrettes avec n=3	115
5.3	Calcul d'une barrette candidate, avec n=1	116
5.4	Calcul d'une barrette candidate, avec n=2	117
5.5	Effet de la fenêtre sur la corrélation	139

Bibliographie

- [1] Dominique Auzias and Jean Paul Labourdette. *Petit Futé -Sahara*. www.petitfute.com/ www.horizonsnomades.fr, 737 pages, 2011.
- [2] Monique Mainguet. Le borkou : aspect d'un modèle éolien. *Annales de Géographie*. t.77, n° 421, pages 296–322, 1968.
- [3] Antoine LEFEBVRE. *Contribution de la texture pour l'analyse d'images à très haute résolution spatiale. Application à la détection de changement en milieu périurbain*. PhD thesis, Université Rennes 2 Haute-Bretagne, 2011.
- [4] Salim CHITROUB. Combinaison de classifieurs : une approche pour l'amélioration de la classification d'images multisources/multidates de télédétection. Xème Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF.
- [5] R.A. BAGNOLD. *The physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London : Chapman and Hall, 1941.
- [6] Christophe Gouinaud, Atteib Ibrahim Doutoum, Pascale Gouinaud, and Mamadou Kaba Traoré. Sar image automated detection of dune area. *Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International. Melbourne - Australia*, pages 1489–1492, july 2013.
- [7] Rignot E.J.M. and Van Zyl J.J. Change detection techniques for ers-1 sar data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol.31, N4, pages 896–906, july 1993.
- [8] Centre canadien de télédétection. *Surveillons notre Planète de l'Espace*. Ressources naturelles Canada, 2000.
- [9] Centre canadien de télédétection. *Notions fondamentales de télédétection*. Ressources naturelles Canada, 1994.
- [10] Claude Kergomard. Actes des journées de télédétection en sciences humaines. <http://cyber-geo.revues.org/1679>.
- [11] Campbell J.B. (1987) *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press, New York.
- [12] Lillesand T.M. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons Inc., New York, 1994.
- [13] Institut français de l'environnement. *Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des graviers*. Office national de la chasse et de la faune sauvage, 2005.
- [14] Danielle DUCROT. *Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources. Extraction de caractéristiques du paysage*. Habilitation à diriger des recherches. INP Toulouse, dec 2005.

- [15] Sophie PAQUERAULT. *Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications (ENST) de Paris, 06 avril 1998.
- [16] Robert DESJARDINS. *La télédétection : perspective analytique*. Editions ESTEM, 232 pages, 2000.
- [17] Henri Maitre. *Traitement des images de RSO*. Information - Commande - Communication, 2001.
- [18] Merrill I. Skolnik, editor. *Radar Handbook, Mc Graw-Hill, Seconde Edition, 1990. 1200 pages*.
- [19] Henri Maitre. Le traitement des images. *Hermes Sciences Publications*, pages 43,47,49,108,112,248, 2003.
- [20] Erwan PATHIER. *Apports de l'interférométrie RADAR différentielle à l'étude de la tectonique active de taiwan*. PhD thesis, Université de Marne la Vallée., 2003.
- [21] Lancaster N. *Geomorphology of desert dunes*, 1995. Routledge, New York.
- [22] Zhu Z., Liu S., Wu Z., and X. Di. *Desert in china*, 1986. Intitute of Desert Research, Lanzhou, China, Academia Sinica.
- [23] Muthar Qong and Takamura H. The formation of the tamarix cones in the southern part of the taklimakan desert. *J. of Arid Land Studies* 6(2) :121-130, 1997.
- [24] Laïc Eric and VAN LANDEGHEM Maxime. *Projet d'échells d'espace et de temps : les dunes*, 2007. 123ème promotion de l'ESPCI.
- [25] H.J. Herrmann¹ and P. Rognon². *La physique des dunes*.
- [26] M Sorensen. in proc. int. workshop physics of blown sand. *Univ. of Aarhus, Denmark*, pages 141–190, 1985.
- [27] Lettau. Bulk transport of sand by the barchan of the pampa de la joya in southern peru. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.I*, pages 182–195, 1969.
- [28] G. Sauermann, K. Kroy, and H.J Herrmann. *Saturation Transients in Saltation and their Implications on Dunes Shapes*. preprint, 2001.
- [29] A.R. Lima, G. Sauermann, H.J Herrmann, and K. Kroy. Modeling a dune field. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 310(3-4), pages 487–500, december 2002.
- [30] G. Sauermann, P. Rognon, A. Poliakov, and H.J Herrmann. The shape of the barchan dunes of southern morocco. *Geomorphology*, 36, pages 47–62, june 2000.
- [31] Mary C. Bourke, Nick Lancaster, Lori K. Fenton, Eric J.R. Parteli, James R. Zimbelman, and Jani Radebaugh. Extraterrestrial dunes : An introduction to the special issue on planetary. *Geomorphology*, 121, pages 1–14, April 2010.
- [32] Muthar Qong. Sand dune attributes estimated from sar images. *Elsevier Sciences*, pages 217–228, 2000.
- [33] Théodore MONOD. *Terre et ciel. Entretien avec Sylvain Estibal*. Actes sud, 317 pages, 1998.
- [34] Blom R.G and Elachi C. Spaceborne and airborne imaging radar observations of sand dunes. *J.Geophys.* 86, pages 3061–3073, 1981.
- [35] Blom R.G and Elachi C. Mutifrequency and multipolarization radar scatterometry of sand dunes and comparison with spaceborne and airborne radar iamges. *J.Geophys. Res.* 92 :7889-3073, 1987.

¹PMMH, ESPCI, 10, rue Vauquelin, 75231 Paris, France

²Univerité Pierre et M. Curie, Jussieu, France, 75231 Paris, France

- [36] Blom R.G. Effects of variation in look angle and wavelength in radar images of volcanic and aeolian terrains, or now you see it, now you don't. *Int. J. Remote Sens.* 9(5) :945-965, 1988.
- [37] Blumberg D.G. Remote sensing of desert dune forms by polarimetric synthetic aperture radar (sar). *Remote Sens. Environ.* 65 :204-216, 1998.
- [38] Valenzuela G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves - review. *Bound. Layer Met.* 13 :61-85, 1978.
- [39] Lyzenga D.R. An analytic representation of the synthetic aperture radar image spectrum for ocean waves. *J. Geophys. Res.* 93 :13859-13865, 1988.
- [40] Iguchi T., Inomata H., Masaki H., and Fugono N. Ocean wave spectra derived from shuttle imaging radar-b imagery and surface measurements. *J. Geophys. Res.* 93 :15367-15373, 1988.
- [41] Vachon P.W. and Dobson F.W. Validation of wind vector retrieval from ers-1 image over the ocean. *The Global Atmosphere and Ocean System* 5 :177-187, 1996.
- [42] Muthar Qong. Estimation of linear dune features including height, slope and direction from sar image., 1999. In Books of Abstracts, Second International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, ITC, The Netherlands.
- [43] Alpers W.R. and Rüfenach C.L. The effect of orbital motions on synthetic aperture radar imagery of ocean waves. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Antennas Propag. AP-27* :685-690, 1979.
- [44] Hasselmann K., Raney R.K., Plant W.J., Alpers W.R., Shuchman R.A., Lyzenga D.R., Rüfenach C.L., and Tucker M.J. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging : A marasen view. *J. Geophys. Res.* 90 :4659-4686., 1985.
- [45] Christophe Gouinaud. *Traitement d'images satellitaires pour la détection d'agglomérations*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications(ENST) de Paris, 20 décembre 1996.
- [46] Olivier Coulon. Analyse d'images : Introduction au recalage. [http ://www.esil.univ-mrs.fr/ocoulon](http://www.esil.univ-mrs.fr/ocoulon).
- [47] Gouinaud Christophe. *Manuel des programmes stat, xdess, xstat_ classe et xrecal*. UBP-LIMOS, juin 2012.
- [48] D. LU, P. MAUSEL, E. BRONDIZIO, and E. MORAN. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, vol.25, pages 2365–2407, june 2004.
- [49] Dominique DAGORNE. Modélisation géométrique en télédétection. Superposition et Rectification de données satellitaires et spatialisées, SEMINFOR 2.
- [50] Thi Thanh Hien PHAM, Ferdinand BONN, and Jean-Marie DUBOIS. Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution : Application à une région littorale au viêt-nam. *Revue Télédétection*, vol. 7, pages 303–323, août 2007.
- [51] Lu D., Mausel P., Brondizio E., and Moran E. Change detection tectonique. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n 12, pages 2365–2407, 2004.
- [52] Dekker R.J. Speckle filtering in satellite sar change detection imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, N6, pages 1133–1146, 1998.
- [53] Alparone A., Baronti S., Falugi M., and Garzelli A. A unified approach to change analysis and despeckle of multitemporal ers-1, May 31-June 1 1999. EARSeL'99 Symposium, Vallodolid, Spain.

- [54] J.E. Hutchinson. Fractals and self similary. *Indiana University Journal of Mathematics*, pages 713–747, 1981.
- [55] C.A. Barahona, F.and Cabrelli and U.M. Molter. Computing the hutchinson distance by networks flows problems. *Random and Computational Dynamics*, pages 117–119, 1992.
- [56] C.A. Barahona, F.and Cabrelli and U.M. Molter. Matching probabiltiy measures on the line under translation. *Random and Computational Dynamics*, pages 121–135, 1995.
- [57] Moncef DAOUD, Ali Ridha MAHJOUB, and Mikael TANGUY. Techniques de flots et comparaison d’images en 2d, 15-19 sep 1997. Seizième Colloque GRETI - Grenoble.
- [58] Kuan D.T., Sawchuk A.A., Strand T.C., and Chavel P. Adaptative noise smoothing filter for images with signal-dependent noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. pami 7, n 2, pages 165–177, 1985.
- [59] Youcef SMARA, Khedidja SAIB, and Amina ZOUAOUI. Détection de changements de zones urbaines et péri-urbaines de la région d’alger à l’aide de l’imagerie sar, 2-5 December 2003. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Marocco.
- [60] Huot E., Rudant J.P., Classeau N., Flasque B., Guillope P., Herlin I., Sigelle M., and Stroobants W. Image processing for multitemporal sar images, 1998. Proceeding of European Symposium on Remote Sensing, volume SAR Image Analysis, Modelling, and Techniques, Barcelona, Spain, EOS-SPIE.
- [61] Lopez A. *Cours de base physique-Rétrodiffusion radar*. GDTA-CESR, 118 avenue Edouard Belin - Toulouse, 1990.
- [62] G. BAUDOIN and J.F BERCHER. *Transformée de Fourier Discrète*. École Supérieure d’Ingénieurs en Électrotechnique et Électronique, Novembre 2001.
- [63] Davaid K. MASLEN and Daniel N. ROCKMORE. The cooley-tukey fft and group theory. *MSRI Publications*, Vol.46, pages 281–300, 2003.
- [64] Ali KHAZÂAL. *Reconstruction d’images pour la Mission Spatiale SMOS*. PhD thesis, Univerité Paul Sabatier (Toulouse III), 30 octobre 2009.
- [65] Guillaume HIET. Cours de traitement de signal - transformées discrètes, 17 octobre 2007. ESTACA.
- [66] Jean-Marc Vézien. *Traitement des images et Vision par ordinateur*. École des Sciences et Technologies du Numérique qui forme l’Ingénieur et l’Homme.
- [67] Jacky DUMAS and Bruno BENNEVAULT. *Analyse du signal (FFT et filtrage numérique) et Analyse des systèmes*. Groupe MVI technologies, Février 2001.
- [68] Youcef SMARA. *Réduction du speckle dans les images radar SAR : concepts et algorithmes*. International conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 27-31, 2005 - TUNISIA.
- [69] T. Liebling and H. Rothlisberger. *Infographie et applications*. Masson, 1988.
- [70] Edmond NEZRI. *Restauration de la réflectivité radar pour l’utilisation conjointe des images radar et optique en télédétection*. PhD thesis, Univerité Paul Sabatier (Toulouse III), 3 juillet 1992.
- [71] Lopes A., Touzi R., and Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 6, pages 992–1000, 1990a.
- [72] J.W Goodman. Some fundamental properties of speckle. *J.Opt. Soc. Am.*, Vol.66 num 11, pages 1145–1150, novembre 1976.

-
- [73] Catherine D. Neish, Ralph D. Lorenz, Randolph L. Kirk, and Lauren C. Wye. Radarclinometry of the sand seas of africa's namibia and saturn's moon titan. *Icarus* 208, pages 385–394, jan 2010.
 - [74] Curlander John C. and McDonough Robert N. *Synthetic Aperture Radar : Systems and Signal Processing*.
 - [75] Ruck G.T., Barrick D.E., Stuart W.D., and Krichbaum C.K. Radar cross section handbook., 1970. Plenum Press, New York, NY, 949.
 - [76] Atteib Ibrahim Doutoum, Christophe Gouinaud, Pascale Gouinaud, and Mamadou Kaba Traoré. Using a shape from shading method for characterization of dune displacement in sar image. *Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. Québec - Canada*, page Waiting for proceeding, july 2014.
 - [77] Christophe Gouinaud, Atteib Ibrahim Doutoum, Pascale Gouinaud, and Mamadou Kaba Traoré. Utilisation d'images sar pour le suivi des déplacements des dunes. *Colloque sur l'Optimisation et les Systèmes d'Information, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, Algérie*, juin 2014.